

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИВАРНЫХ ШПИЛЕК ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

В.В. КНЫШ¹, С.А. СОЛОВЕЙ¹, А.А. ГРИШАНОВ¹, Г.О. ЛИННИК², М.Г. МАЛЬГИН³

¹ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Укрзалізниця, 03680, г. Киев-150, ул. Тверская, 5. E-mail: cpi@lotus.uz.gov.ua

³MIDAS Information Technology Co., г. Сеул, Корея. E-mail: malgin@midasit.com

Предложена новая конструкция крепления плит безбалластного мостового полотна к тавровым балкам железнодорожных мостов, которая предусматривает замену резьбовых шпилек на приварные. Дугоконтактная сварка позволяет размещать шпильки непосредственно над вертикальной стенкой тавровой балки, что не приводит к угловой деформации верхнего пояса балки, характерной при использовании резьбовых шпилек. Целью настоящей работы являлась оценка возможности применения приварных шпилек для крепления плит безбалластного мостового полотна при строительстве и ремонте железнодорожных мостов. Для этого на модельных образцах были проведены испытания на усталость сварных соединений шпильки с верхним поясом тавровой балки из наиболее применяемых сталей Ст3сп и 09Г2С при различных размахах нагружения, которые реализуются в предварительно затянутой шпильке усилием 6 тс, во время прохождения подвижного состава. Установлено, что циклическая долговечность таких соединений превышает $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений при размахах нагружения $\Delta P \leq 3$ тс. Численным моделированием показано, что при применении в качестве прокладочного слоя между плитой безбалластного мостового полотна и тавровой балкой дубовой доски и резиновой полосы циклическая долговечность приварной шпильки не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений, поскольку размах нагружения превышает $\Delta P = 3$ тс. Однако использование в качестве прокладочного слоя быстротвердеющих безусадочных смесей (монолитного бетона) позволяет снизить размах нагружения до $\Delta P = 1$ тс, что гарантированно обеспечивает долговечность приварной шпильки не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений. Библиогр.13, табл. 2, рис. 16.

Ключевые слова: сварное соединение, приварная шпилька, плита безбалластного мостового полотна, сопротивление усталости, испытания на усталость

Предотвратить зарождение и развитие трещин усталости в сварных узлах и элементах конструкций пролетных строений железнодорожных мостов можно с помощью не только технологических способов (мероприятий), направленных на повышение сопротивления усталости сварных соединений, но и путем совершенствования существующих конструктивных решений, в том числе конструкции мостового полотна, которая существенно влияет на долговечность пролетного строения железнодорожного моста [1–4]. Пер-

спективным направлением улучшения технических характеристик эксплуатируемых строений является постепенная замена мостового полотна на деревянном бруске мостовым полотном на железобетонных плитах, которое имеет следующие преимущества: высокую стабильность положения элементов и длительный срок эксплуатации; защищает от коррозионного воздействия и загрязнения верхние пояса балок и связи между ними; является экономным по суммарной стоимости изготовления, укладки и эксплуатации на протяжении

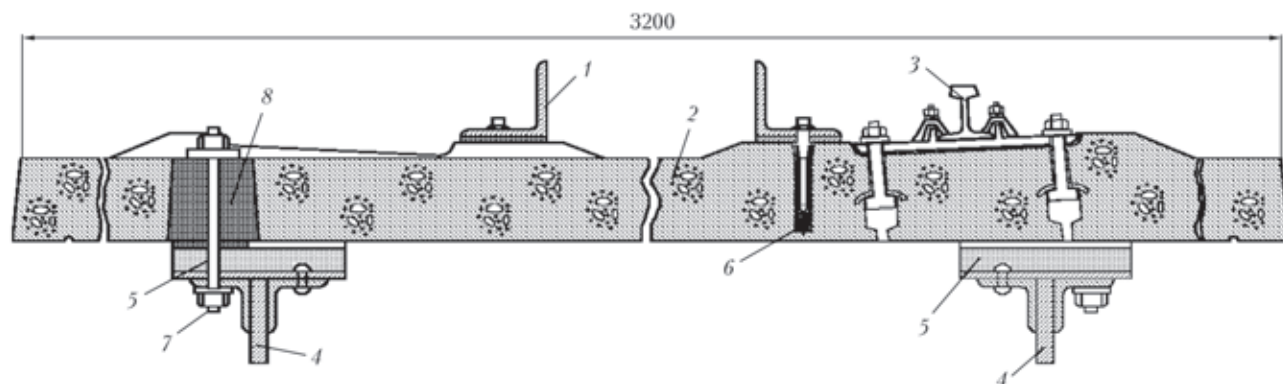


Рис. 1. Конструкция мостового полотна на плитах БМП: 1 — контругольник; 2 — железобетонная плита мостового полотна; 3 — рельс; 4 — главная или продольная балка; 5 — прокладочный слой; 6 — полимерный дюбель с путевым шурупом; 7 — высокопрочная шпилька; 8 — отверстие для шпильки

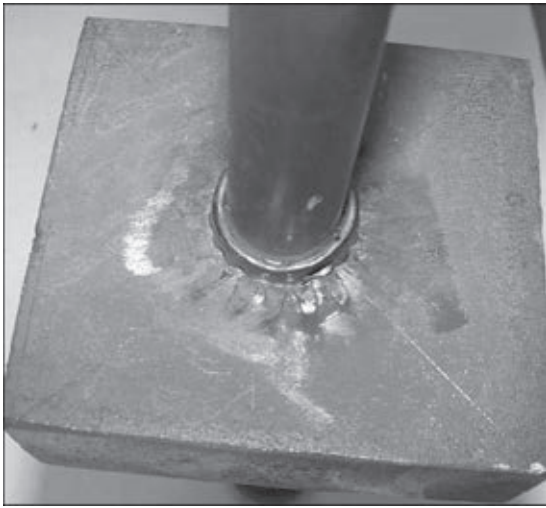


Рис. 2. Сварное соединения шпильки с пластиной

срока службы моста. Однако конструкция мостового полотна на железобетонных плитах (рис. 1) имеет некоторые недостатки, к которым можно отнести применяемую конструкцию крепления плиты к главным или продольным тавровым балкам пролетного строения. Существующая технология крепления плит безбалластного мостового полотна (БМП) съемными высокопрочными резьбовыми шпильками предусматривает их установление с эксцентриситетом по отношению к вертикальной стенке продольной балки, вследствие чего появляется дополнительная нагрузка на верхний пояс тавровой балки при прохождении состава, что приводит к преждевременному зарождению трещин усталости типа T_4 и T_9 [5]. Очевидно, что для устранения указанного эксцентриситета необходимо разместить шпильки крепления плит БМП в плоскости вертикальной стенки тавровой балки. Такое конструктивное решение возможно лишь при условии применения процессов сварки. Учитывая сжатые нормативные сроки на организацию работ по замене мостового полотна, а также возможность использования стандартных крепежных деталей, наиболее целесообразно производить приварку шпилек с помощью технологии дугоконтактной сварки. Однако данный сварной элемент (приварная шпилька, работающая при переменном растяжении) отсутствует в отечественных и зарубежных нормативных документах по расчету на усталость [6–9].

Поэтому цель настоящей работы — оценить возможность применения приварных шпилек для крепления плит БМП при строительстве и ремонте железнодорожных мостов.

Материал и методика исследований. Экспериментальные исследования сопротивления усталости сварного соединения шпильки с верхним поясом цельной (не составной) тавровой балки проводили на модельных образцах, состоящих из следующих основных частей: шпильки; пла-

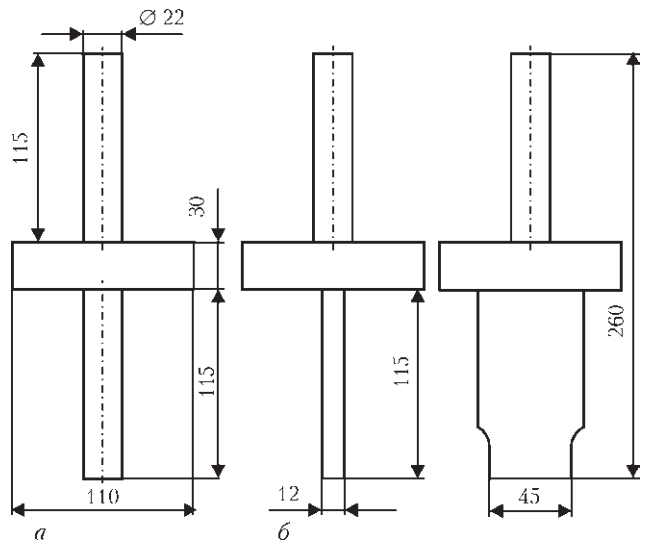


Рис. 3. Чертеж модельного образца сварного соединения шпильки крепления плит БМП с верхним поясом тавровой балки с цилиндрической (а) и призматической (б) захватными частями (первая серия образцов)

стины, которая имитировала сплошной верхний пояс тавровой балки; захватной части. Шпильку из низколегированной стали 09Г2С приваривали дугоконтактной сваркой по центру пластины (рис. 2), а захватную часть — электродуговой сваркой штучными электродами УОНИ-13/55. Размеры захватной части обусловлены захватными устройствами испытательной машины ZDM-10pu, которая позволяет проводить испытания образцов при переменных напряжениях знакопостоянного или знакопеременного циклов в диапазоне нагрузений ± 10 тс. Испытания модельных образцов проводили при одноосном циклическом растяжении с частотой 5 Гц. Такая схема нагружения отвечала схеме нагружения высокопрочных шпилек при креплении плит БМП в пролетных строениях железнодорожных мостов. В качестве критериев завершения испытаний принималось полное разрушение образца или превышение базы испытаний $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

Первая серия образцов для усталостных испытаний состояла из четырех модельных образцов, в которых шпильку диаметром 22 мм приваривали к пластине из стали 09Г2С ($\sigma_T = 375$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа) толщиной 30 мм: по два образца с цилиндрической и призматической захватными

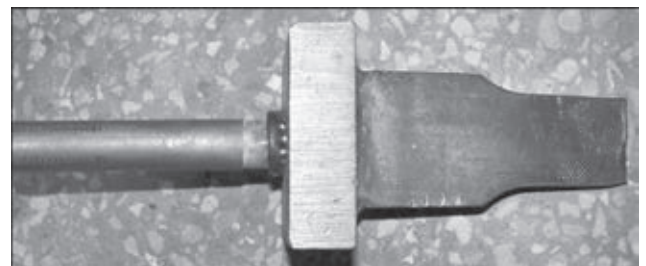


Рис. 4. Общий вид сварного модельного образца для испытаний на усталость с призматической захватной частью

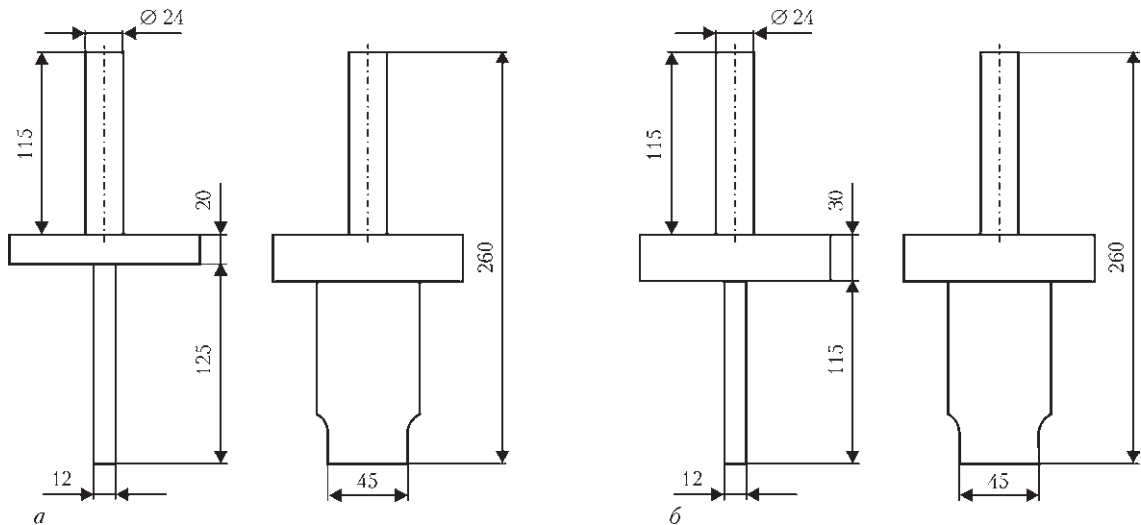


Рис. 5. Чертеж модельного образца сварного соединения шпильки крепления плит БМП с верхним поясом тавровой балки из сталей СтЗсп (а) и 09Г2С (б) соответственно вторая и третья серии образцов

ми частями (рис. 3, 4). Испытания проводили при отнулевом растяжении с максимальным усилием 6 тс. Такое нагружение шпилек было экспериментально установлено на натуральных конструкциях, прокладочный слой (см. рис. 1) которых состоит из дубовой доски размером 200×40 мм и резиновой полосы размером 200×8 мм. Следует отметить, что данная конструкция прокладочного слоя на сегодня является основной при строительстве и ремонте железнодорожных мостов Украины.

По результатам испытаний первой серии образцы были усовершенствованы и скорректирована методика их испытаний. Диаметр привариваемой шпильки увеличили до 24 мм. Учитывая, что большинство тавровых балок пролетных строений железнодорожных мостов изготовлены из малоуглеродистой стали СтЗсп и низколегированной стали 09Г2С, в модельных образцах второй серии шпильку диаметром 24 мм приваривали к пластине из стали СтЗсп ($\sigma_T = 235$ МПа, $\sigma_B = 420$ МПа) толщиной 20 мм, а в образцах тре-

тней серии шпильку диаметром 24 мм приваривали к пластине из стали 09Г2С ($\sigma_T = 375$ МПа, $\sigma_B = 510$ МПа) толщиной 30 мм (рис. 5). Каждая серия состояла из восьми образцов. Захватную часть образцов изготавливали призматической. Испытания проводили по следующей методике. Циклическую долговечность сварных соединений шпильки устанавливали при различных размахах нагружения. Максимальная приложенная нагрузка не изменялась и составляла 6 тс, что соответствовало усилию затяжки шпилек при монтаже плит БМП. Начальная минимальная приложенная нагрузка составляла 0 тс, что соответствовало полной разгрузке шпильки. Если при заданном первоначальном размахе нагружения 6 тс происходило преждевременное разрушение двух образцов при долговечностях не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений, то размах уменьшали на 1 тс за счет увеличения минимальной нагрузки. Схематическое изображение размахов нагружения при испытаниях на усталость второй и третьей серий образцов приведено на рис. 6.

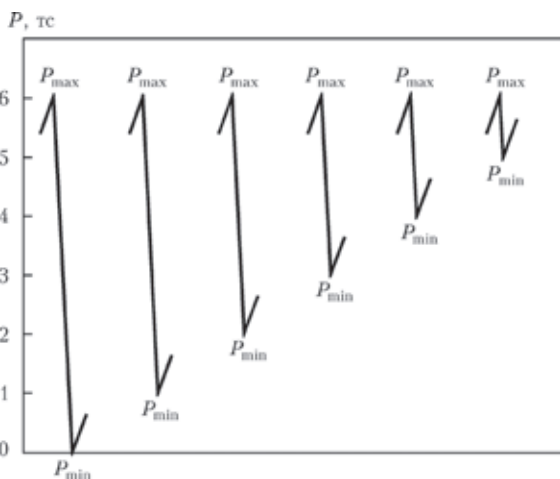


Рис. 6. Схематическое изображение размахов нагружения при испытаниях на усталость сварных модельных образцов второй и третьей серий

Результаты исследований. Разрушение всех образцов первой серии произошло по сварному соединению шпильки с пластиной, которая имитировала сплошной горизонтальный пояс тав-

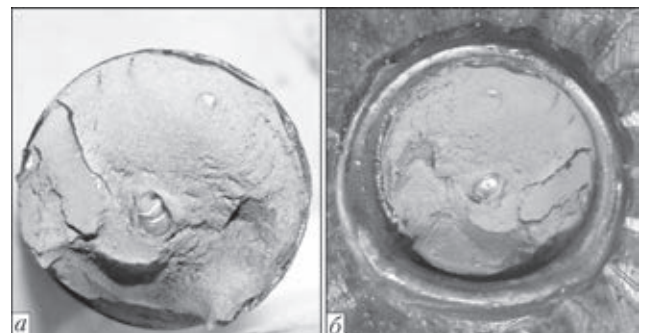


Рис. 7. Внутренние дефекты сварки в образце № 3 первой серии: а — поры; б — несплавления

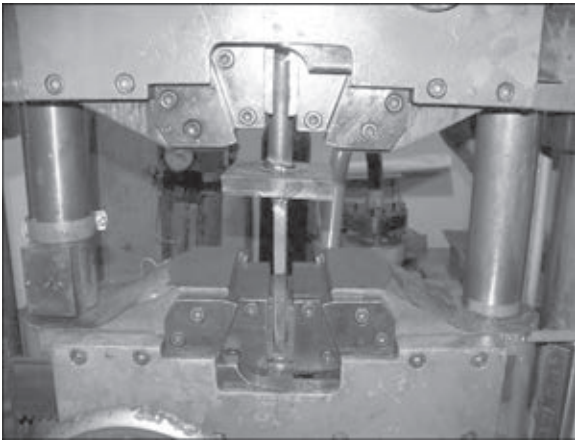


Рис. 8. Испытание на усталость образца сварного соединения второй серии на машине ZDM-10pu

ровой балки. Экспериментально установленная долговечность образцов находится в диапазоне от 53 500 до 105 600 циклов перемен напряжений (при этом не обеспечивается необходимая циклическая долговечность $\leq 5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений):

Номер образца	1	2	3	4
Количество циклов до разрушения N	105600	165800	53500	175900

Проведенный фрактографический анализ мест разрушения выявил наличие таких внутренних дефектов, как пора по центру сварного соединения и непровар по контуру (рис. 7). Наличие дефектов свидетельствует о возможных отклонениях технологических параметров сварочного процесса, вызванных влиянием внешних факторов или недостаточной отработкой технологии сварки. Следует отметить, что при нагружении модельного образца отнулевым усилием 6 тс максимальные напряжения в рабочем сечении приварной шпильки диаметром 22 мм достигают

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость модельных образцов второй и третьей серий

Номер образца	Количество циклов до разрушения N	
	вторая серия	третья серия
1	433500	782400
2	371600	499800
3	1011900	623600
4	863000	1326100
5	1757600	4080800
6	2873300	1062500
7	> 5000000	2873300
8	> 5000000	> 5000000

Примечания. 1. У всех образцов второй и третьей серии $P_{max} = 6$ тс. 2. У образцов № 1, 2 $P_{min} = 0$ тс; у № 3, 4 – 1; у № 5, 6 – 2; у № 7, 8 – 3.

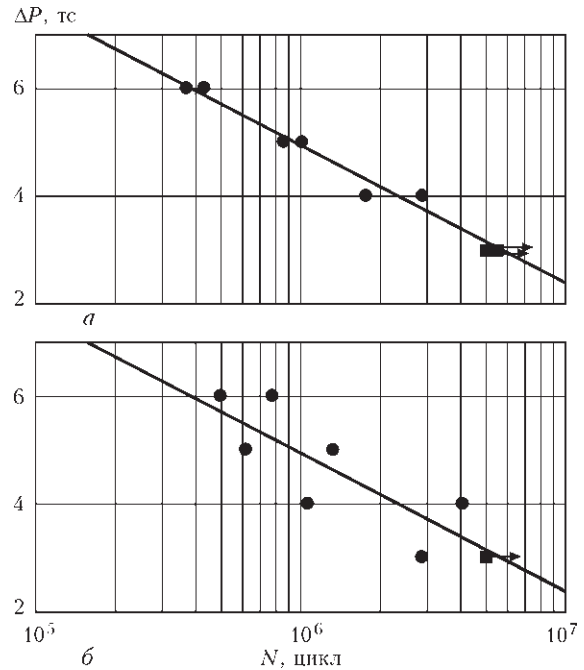


Рис. 9. Кривая усталости сварных соединений шпильки диаметром 24 мм с пластиной из сталей Ст3сп (а) и 09Г2С (б)

160 МПа. При таких напряжениях ограниченная долговечность бездефектных стыковых сварных соединений находится на уровне $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений при вероятности неразрушения 50 % [10, 11]. Расчетное значение предела ограниченной выносливости стыковых сварных соединений на базе не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений при 95 % вероятности неразрушения согласно [6] составляет 114 МПа. При этом следует учитывать, что значения коэффициента концентрации напряжений соединения шпильки с пластиной значительно превышают значения коэффициента концентрации напряжений, которые характерны для стыковых соединений ($\alpha_\sigma = 1,1 \dots 1,3$). Таким образом, по результатам испытаний первой серии образцов можно сделать вывод, что применение приварных шпилек в пролетных строениях железнодорожных мостов возможно при условии уменьшения действующих напряжений в рабочем сечении шпильки за счет увеличения диаметра шпильки и уменьшения размахов нагружения при применении новых конструкций прокладочного слоя между плитой БМП и верхним поясом тавровой балки.

Оборудование для дугоконтактной сварки «Nelson nelweld 6000» предусматривает приварку шпилек диаметром 24 мм. Увеличение диаметра шпильки с 22 до 24 мм позволяет уменьшить максимальные напряжения в рабочем сечении с 160 до 130 МПа.

Испытания второй и третьей серий модельных образцов также проводили на машине ZDM-10pu при частоте 5 Гц (рис. 8).

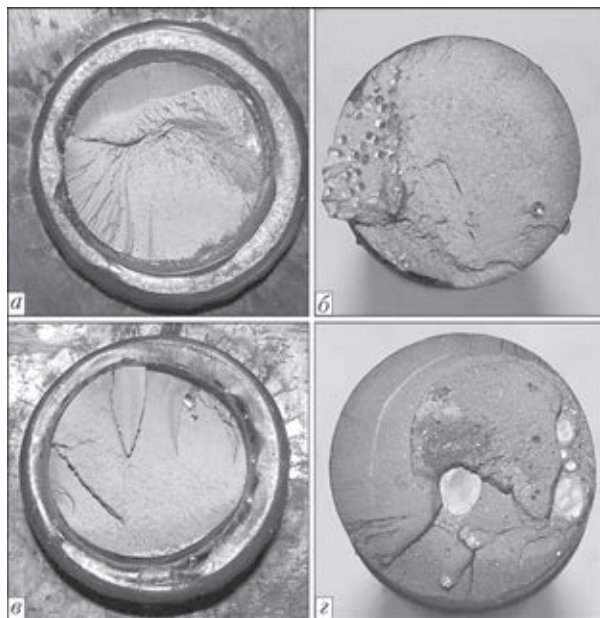


Рис. 10. Изломы сварных модельных образцов № 3, 4 второй (а, б) и № 5, 6 третьей (в, з) серии

Результаты усталостных испытаний образцов второй серии (шпильку приваривали к пластине из стали СтЗсп) и третьей (шпильку приваривали к пластине из стали 09Г2С) приведены в табл. 1, а на рис. 9 представлены соответствующие кривые усталости. Разрушение образцов второй серии происходило по сварному соединению шпильки с пластиной. Циклическая долговечность испытанных образцов превышает значения $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений при размахах нагружения $\Delta P \leq 3$ тс. Проведен фрактографический анализ мест излома модельных образцов. Наличие таких внутренних дефектов, как поры (рис. 10, б), снижает циклическую долговечность образцов на 20 % (долговечность образца № 4 с порами 863000 циклов перемен напряжений, а образца № 3 без пор — 1011900 циклов перемен напряжений).

Таблица 2. Свойства материалов прокладочного слоя между плитой БМП и верхним поясом тавровой балки

Материал	Элемент мостового полотна	Значение модуля упругости E , МПа		Коэффициент Пуассона ν
		диапазон	расчетное	
Бетон	Плита БМП	$3 \cdot 10^4$		0,2
Бетон	Прокладочный слой	$3 \cdot 10^4$		0,2
Дерево поперек волокон	««	500...1000*	750	0,16
Резина	««	7...14**	10	0,5
Сталь	Шпилька	$2,1 \cdot 10^5$		0,3

* Данные взяты из работы [13], ** – из [4, 13].

Разрушение образцов третьей серии, происходило по сварному соединению шпильки с пластиной. Циклическая долговечность испытанных образцов также превышает значения $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений при размахах нагружения $\Delta P < 3$ тс. При этом экспериментальные данные образцов третьей серии имеют больший разброс в сравнении с образцами второй. Наличие пор и несплавлений (рис. 10, з) снижает циклическую долговечность образцов до 4 раз (долговечность образца № 5 4080800 циклов перемен напряжений, а образца № 6 без пор — 1062500 циклов перемен напряжений).

Учитывая данные, полученные на модельных образцах первой серии, увеличение диаметра шпильки с 22 до 24 мм привело к повышению долговечности в 3...6 раз при одинаковых уровнях размахов нагружения от 0 до 6 тс. При этом особенности разрушения исследуемых образцов всех трех серий указывают на необходимость доработки технологии дугоконтактной сварки при приварке шпилек крепления плит БМП. Уменьшение количества внутренних дефектов позволит повысить вероятность неразрушения сварных соединений шпильки диаметром 24 мм при размахе нагружения от 3 до 6 тс.

Данные натурных исследований показали, что при использовании прокладочного слоя между плитами БМП и тавровой балкой (дубовая доска и резиновая полоса) размахи нагружения ΔP , действующие на приварную шпильку, превышают 3 тс. Диапазон рабочих переменных усилий в шпильке от 3 до 6 тс может быть достигнут путем увеличения жесткости прокладочного слоя, например, благодаря применению быстротвердеющих безусадочных смесей (бетонов).

Поскольку напряженно-деформированное состояние элементов мостового полотна в исходном состоянии и при прохождении подвижного состава зависит от прокладочного слоя между плитой БМП и тавровой балкой, был выполнен численный расчет изменения начального (6 тс) усилия затяжки приварной шпильки во время прохождения подвижного состава в зависимости от применяемых типов прокладочных слоев. Все численные расчеты проводили в программном комплексе midas Civil с использованием метода конечных элементов.

При проведении численного моделирования исходили из следующих положений: железобетонная плита БМП имела типовые геометрические размеры [12], диаметр приварной шпильки 24 мм, начальное усилие затяжки 6 тс, осе-

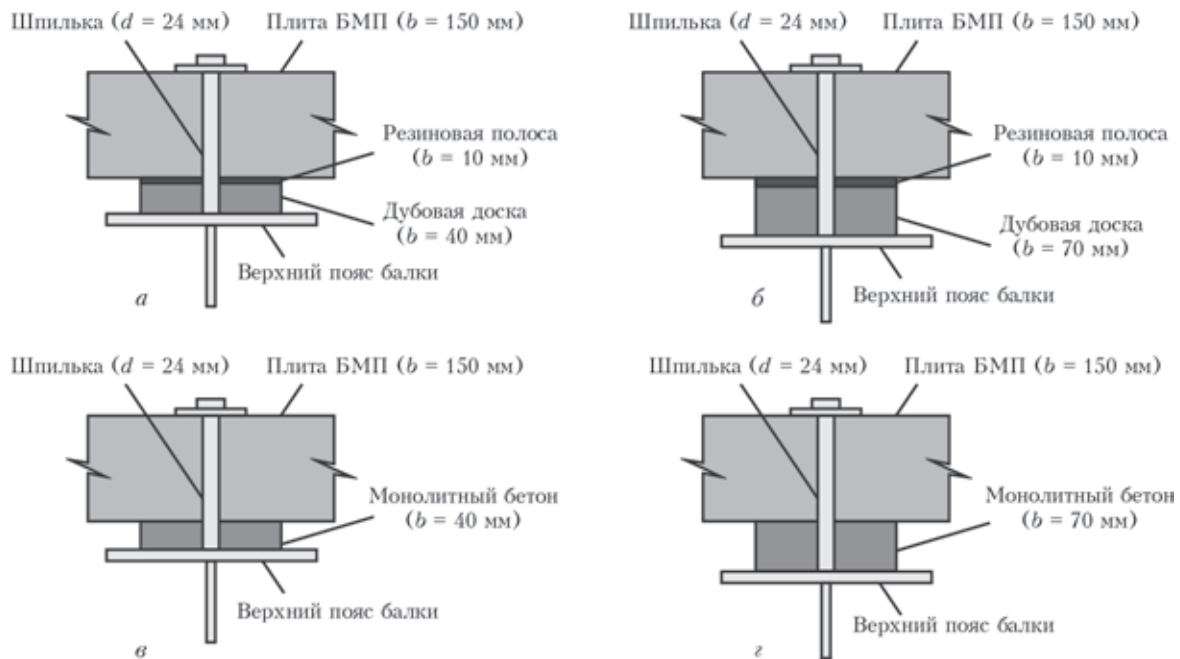


Рис. 11. Типы прокладочных слоев мостового полотна: *a* — дубовая доска толщиной 40 мм и резиновая полоса толщиной 10 мм; *б* — дубовая доска толщиной 70 мм и резиновая полоса толщиной 10 мм; *в, з* — монолитный бетон соответственно толщиной 40 и 70 мм

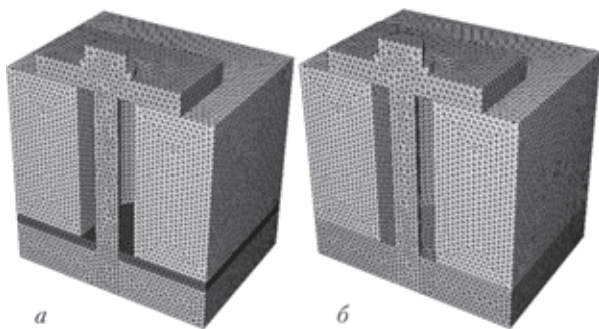


Рис. 12. Фрагменты расчетных моделей при прокладочном слое из дерева и резины (*a*) и монолитного бетона (*б*)

вое нагружение от железнодорожного транспорта 30 тс.

Исследовали четыре прокладочных слоя между плитой БМП и тавровой балкой: дубовую доску толщиной 40 мм и резиновую полосу толщиной 10 мм (рис. 11, *a*), дубовую доску толщиной 70 мм и резиновую полосу толщиной 10 мм (рис. 11, *б*), монолитный бетон толщиной 40 (рис. 11, *в*) и 70 мм (рис. 11, *з*). Во всех расчетных схемах ширина элементов прокладочного слоя составляла 200 мм, расчетные модели аппроксимировали конечными элементами в виде четырехгранников (рис. 12). Свойства материалов прокладочного слоя, принятые в численном расчете, приведены в табл. 2 [4, 13].

Начальное усилие затяжки шпильки 6 тс задавали перемещением ее основания на соответствующую величину, что имитировало прижатие железобетонной плиты к прокладочному слою. При этом снижение усилия затяжки (разгрузку шпильки) осуществляли приложением распределенной нагрузки на поверхность плиты БМП от давления

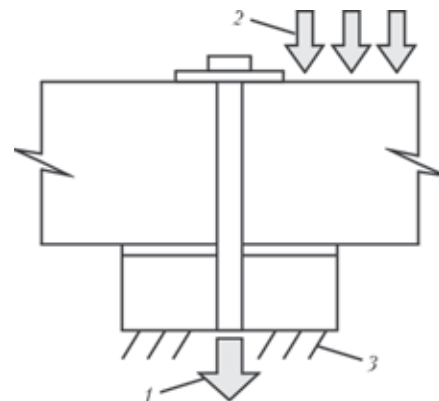


Рис. 13. Схема расчетной модели: 1 — заданное перемещение основания шпильки (затяжка); 2 — давление от колеса транспорта; 3 — жесткое защемление

колеса железнодорожного транспорта. В расчетных моделях в качестве граничных условий вводили запрет линейных и угловых перемещений узлов на нижней поверхности прокладочного слоя (рис. 13).

Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния приварной шпильки при исследуемых четырех типах прокладочного слоя между плитой БМП и верхним поясом тавровой балки. Получены изополя напряжений в приварной шпильке в исходном состоянии (при затяжке усилием 6 тс) и во время прохождения подвижного состава при прокладочном слое из дерева и резины (рис. 14) и монолитного бетона (рис. 15). При затягивании шпильки усилием 6 тс независимо от прокладочного слоя между плитой БМП и верхним поясом тавровой балки в поперечном сечении шпильки возникают напряжения растяжения около 130 МПа (рис. 14, *a, б*; 15, *a, б*). Во

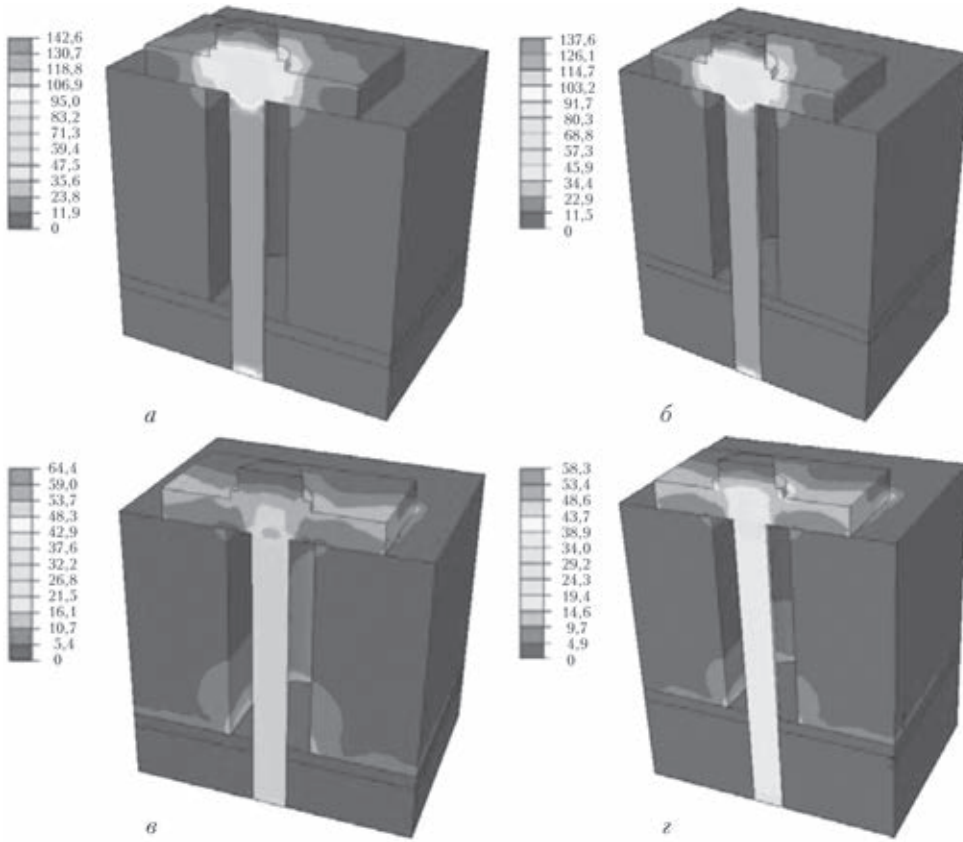


Рис. 14. Изополя напряжений в приварной шпильке в исходном состоянии (*а, б*) и во время прохождения подвижного состава (*в, г*): *а, в* — прокладочный слой из дубовой доски толщиной 40 мм и резиновой полосы толщиной 10 мм; *б, г* — прокладочный слой из дубовой доски толщиной 70 мм и резиновой полосы толщиной 10 мм

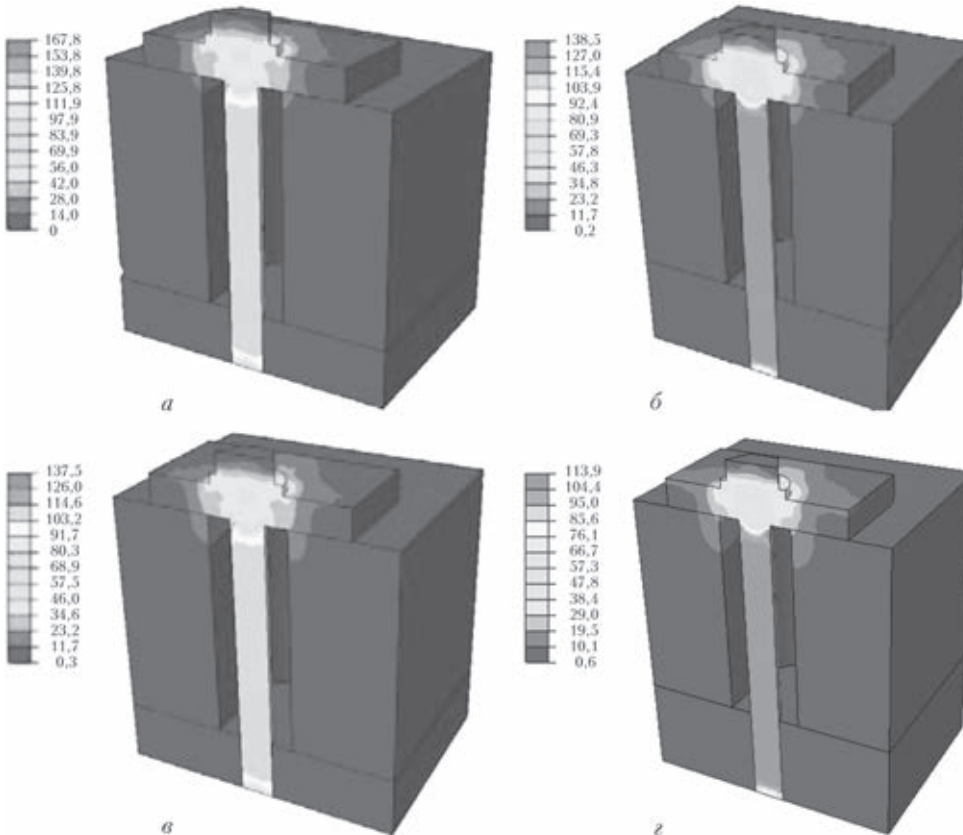


Рис. 15. Изополя напряжений в приварной шпильке в исходном состоянии (*а, б*) и во время прохождения подвижного состава (*в, г*): *а, в* — прокладочный слой из монолитного бетона толщиной 40 мм; *б, г* — то же, но толщиной 70 мм

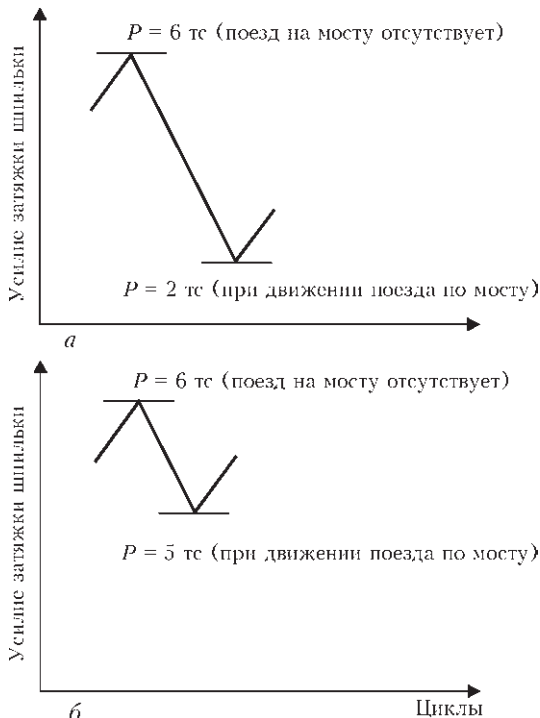


Рис. 16. Схематическое изображение размахов нагружения в шпильке при прокладочном слое из дубовой доски и резиновой полосы (а) и монолитного бетона (б)

время прохождения подвижного состава напряжения в шпильке снижаются до 40 МПа при прокладочном слое из дерева и резины и до 110 МПа при прокладочном слое из монолитного бетона. При увеличении толщины дубовой доски с 40 до 70 мм напряжения в шпильке снижаются на 7 % (см. рис. 14, в, з), а с увеличением толщины монолитного бетона с 40 до 70 мм — на 5 % (см. рис. 15, в, з). Изображение размахов нагружения в шпильке при использовании дерева и резины, а также монолитного бетона представлено на рис. 16.

Выводы

1. Предложена новая конструкция крепления железобетонных плит безбалластного мостового полотна железнодорожных мостов, которая предусматривает приварку шпилек над вертикальной стенкой продольных тавровых балок при их креплении, что устраняет угловую деформацию верхнего пояса.

2. Проведены испытания на циклическую долговечность сварных соединений шпильки (сталь 09Г2С) с верхним поясом тавровой балки (сталь СтЗсп и 09Г2С), полученных дугоконтактной сваркой. Установлена циклическая долговечность таких соединений при разных размахах нагружения, которые реализуются в предварительно затянутой шпильке усилием 6 тс во время прохождения подвижного состава. Показано, что долговечность ($\geq 5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений) сварного со-

единения шпильки обеспечивается при размахах эксплуатационного нагружения $\Delta P \leq 3$ тс.

3. Численным моделированием напряженно-деформированного состояния элементов мостового полотна в исходном состоянии и во время прохождения подвижного состава подтверждены данные натурных исследований о том, что размах эксплуатационного нагружения в приварной шпильке существенно зависит от прокладочного слоя между плитой БМП и балкой. При использовании в качестве прокладочного слоя дубовой доски и резиновой полосы циклическая долговечность приварной шпильки не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений, поскольку размах нагружения $\Delta P \approx 4$ тс. Использование в качестве прокладочного слоя между плитой БМП и тавровой балкой монолитного бетона толщиной 40 или 70 мм позволяет снизить размах нагружения в приварной шпильке до $\Delta P \approx 1$ тс, что гарантировано обеспечивает ее циклическую долговечность не менее $5 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

1. Линник Г.О., Загора О.Л., Марочка В.В. Экспериментальні дослідження несучої здатності поздовжніх балок залежно від типу мостового полотна // Теорія і практика будівництва. – Львів: НУЛП, 2010. – С. 193–195.
2. Линник Г.О. Дослідження місцевих деформацій бетонного прокладного шару при використанні мостового полотна на плитах БМП // Там само. – С. 293–296.
3. Методические указания по устройству прокладочного слоя безбалластного мостового полотна на железобетонных плитах на металлических пролетных строениях железнодорожных мостов для различных условий эксплуатации. – С.-Пб.: НИИМ, 2009. – 36 с.
4. Р 773/11. Полимеркомпозиционный подстилающий слой под плитами безбалластного мостового полотна. Организация сотрудничества железных дорог. – М., 2004. – 15 с.
5. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений. – М.: НИИ мостов ЛИИЖТА, 1990. – 28 с.
6. РД 50-694-90. Методические указания. Надежность в технике. Вероятностный метод расчета на усталость сварных конструкций. – М., 1991. – 83 с.
7. ДБН В.2.3-26:2010. Мости і труби. Сталеві конструкції. Правила проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
8. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-9:2012. Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій. Ч. 1-9: Витривалість (EN 1993-1-9:2005, IDT). – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 77 с.
9. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. – S.l., 2008. – 144 p. – (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07).
10. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 216 с.
11. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В.И. Труфякова: В 2-х т. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.
12. ЦП-0137. Інструкція з укладання та експлуатації безбалластного мостового полотна (БМП) на залізобетонних плитах. – К.: ТОВ «Швидкий рух», 2006. – 100 с.
13. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

Поступила в редакцию 20.11.2014