

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 621.791.09:621.785.375

М. Г. МАЛЬГИН^{1*}, К. В. МЕДВЕДЕВ^{2*}

^{1*} MIDAS Information Technology Co., Ltd. MIDAS IT Tower-Pangyo Seven Venture Valley, 633 Sampyeong-dong Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-400, Korea, тел. +82 31 789 19 92, e-mail malgin@midasit.com

^{2*} Каф. «Мосты и туннели», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел/факс +38 (044) 280 79 78, эл. почта kvmedvediev@gmail.com

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УСТАЛОСТЬ ПО ЛОКАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Цель. Целью работы является разработка новой модели расчета сварных узлов мостовых конструкций на усталость по локальным напряжениям. **Методика.** Проведено теоретическое исследование. Дано описание решения основных выполняемых задач расчета на усталость: разработка расчетной модели конструкции для исследования общей и местной нагруженности элементов; назначение расчетных схем нагружения подвижными нагрузками; назначение расчетных характеристик сопротивления усталости; определение расчетного срока службы конструкции. Приводится пример расчета ресурса типового железнодорожного пролетного строения. **Результаты.** Проанализированы основные недостатки существующей нормативной модели расчета на усталость, обосновано и предложено ее развитие. **Научная новизна.** Разработана и обоснована новая модель расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций. **Практическая значимость.** Предложенная модель позволяет повысить точность расчета ресурса мостов, учитывая особенности конструктивного оформления элементов и их местное НДС, а также позволяет оптимизировать конструктивные формы узлов.

Ключевые слова: усталостная долговечность; мостовые конструкции; сварной узел; метод конечных элементов

Введение

Известно, что в сварных узлах конструкций различного назначения, отвечающих техническим условиям на их изготовление (несущие элементы подвижного железнодорожного состава, пролетные строения мостов, промышленные краны и пр.), в процессе назначенных сроков службы возникают трещины усталости [1-4]. Для поддержания их в исправном состоянии разрабатываются правила их ремонта и эксплуатации. На сегодняшний день проблема повышения надежности элементов железнодорожных и автодорожных мостов является одной из наиболее актуальных.

Основной причиной появления преждевременных усталостных трещин в мостовых конструкциях является то, что уже на стадии проектирования не достаточно полно учитывается действительная работа элементов при эксплуатационном нагружении. Многочисленные экспериментальные и численные исследования действительной нагруженности элементов мостов показывают, что в местах наблюдаемых уста-

лостных повреждений может возникать сложное местное нагружение элементов. При прохождении подвижной нагрузки по мосту, в местах наблюдаемых повреждений, наряду с основными действующими напряжениями, возникают местные дополнительные напряжения. Закономерности изменения местного напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонах повреждения обусловлены двумя основными факторами: конструктивным и силовым, а именно особенностями конструктивных форм узла и способом передачи нагрузки на каждый его элемент при прохождении подвижной нагрузки. Наиболее выражена роль местных дополнительных напряжений в тех сварных узлах конструкций, в которых реализуется пространственный изгиб элементов, стесненное кручение, а так же комбинация действия касательных и нормальных напряжений в плоскости элементов.

В железнодорожных пролетных строениях мостов, наиболее часто, местные дополнительные напряжения проявляются в стенках балок, в местах прикрепления поперечных ребер

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

жесткости [1, 2]. Местное нагружение стенки в тех местах характеризуется тем, что помимо ее общего изгиба в плоскости, возникает и местный поперечный выгиб стенки, приводящий к возникновению в ней стеснения деформаций и дополнительных напряжений в зонах сварных соединений (рис. 1). Данный выгиб возникает при прохождении колеса тележки вагона над узлом. Трещины усталости образуются по линии сплавления шва (см. рис. 1).



Рис. 1. Местная деформация стенки балки и наличие трещины усталости в зоне сварного соединения

В автодорожных мостах наиболее часто местные дополнительные напряжения проявляются в узлах ортотропных плит (ОП) проезжей части [2, 3]. Местное воздействие транспорта на конструкцию ОП приводит к возникновению стесненного кручения продольных ребер жесткости в местах их пересечения со стенкой поперечной балки ОП (рис. 2). В результате возникают местные дополнительные деформации элементов.

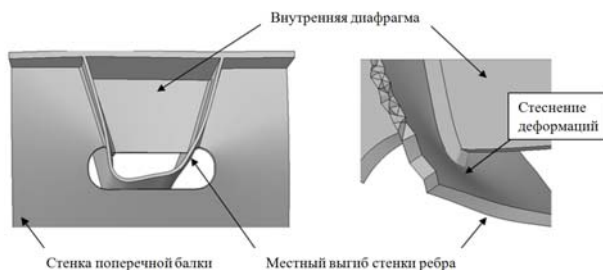


Рис. 2. Местная деформация элементов узла ОП

В местах образования трещин (рис. 3), в зонах сварных соединений, возникают местные допол-

нительные напряжения, которые накладываются на основные от общей деформации элементов ОП.

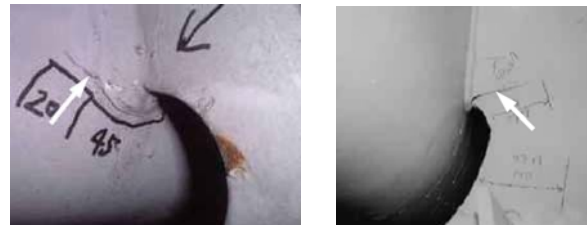


Рис. 3. Наличие трещин усталости в зонах сварных соединений элементов ОП

Фактическое НДС элементов мостов в потенциально опасных зонах (в зонах образования трещин) при прохождении подвижной нагрузки может быть представлено как:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{\text{общ}} & \tau_{xy}^{\text{общ}} \\ \tau_{xy}^{\text{общ}} & \sigma_y^{\text{общ}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_x^{\text{мест}} & \tau_{xy}^{\text{мест}} \\ \tau_{xy}^{\text{мест}} & \sigma_y^{\text{мест}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где σ_x , σ_y , τ_{xy} – полные напряжения в элементе; $\sigma_x^{\text{общ}}$, $\sigma_y^{\text{общ}}$, $\tau_{xy}^{\text{общ}}$ – напряжения в элементе от общей нагруженности конструкции; $\sigma_x^{\text{мест}}$, $\sigma_y^{\text{мест}}$, $\tau_{xy}^{\text{мест}}$ – напряжения в элементе от местной нагруженности конструкции.

Усталостные повреждения элементов конструкции относятся к предельному состоянию, приводящему к разрушению всего сооружения. Соответственно модель расчета мостов на усталость должна способствовать назначению таких конструктивных решений элементов и узлов, которые не будут подвержены повреждениям за весь проектный срок службы моста. Условием, по которому осуществляется оценка сопротивляемости того или иного элемента конструкции усталости, является неравенство в котором внешние переменные усилия в элементе не должны превышать характеристики сопротивления усталости элемента. Данное условие имеет вид:

$$\sigma_{\text{действ}} \leq \sigma_{\text{допуст}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{действ}}$ являются действующими переменными напряжениями в элементе при нагружении, а $\sigma_{\text{допуст}}$ – предельно допустимой величиной напряжений.

Действующий нормативный подход к расчету мостовых конструкций железнодорожных и автодорожных мостов ДБН В.2.3-26:2010 [5] не позволяет учесть влияние местных дополни-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тельных напряжений на долговечность конструкции. Согласно нормам проектирования расчет $\sigma_{\text{действ}}$ в левой части выражения (2) сводится к определению в потенциально опасных местах конструкции номинальных напряжений, действующих в расчетных сечениях несущего элемента конструкции (рис. 4). В выражении (1) такие напряжения характеризуются как общие в сечении $\sigma^{\text{общ}}$. Местные напряжения $\sigma^{\text{мест}}$ игнорируются.

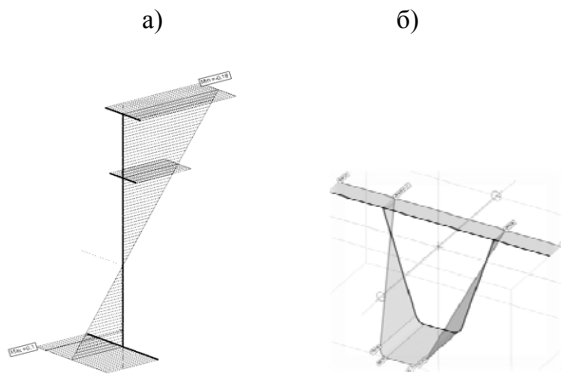


Рис. 4. Пример распределения номинальных напряжений в расчетных сечениях элементов мостов: а – в главной балке пролетного строения; б – в продольном ребре жесткости ОП

В свою очередь общие напряжения в сечениях назначаются нормами исходя из требования рассмотрения общей нагруженности элементов при условных схемах загрузки мостов подвижными нагрузками. Характерной особенностью схемы нормативной нагрузки железнодорожного подвижного состава (СК) является то, что группу сосредоточенных сил от локомотива и вагонов заменяют на эквивалентную равномерно распределенную нагрузку. В рамках определения местной нагруженности узлов железнодорожных мостов такая постановка нагружений не является приемлемой, так как возникает необходимость в анализе закономерностей изменения местного НДС элементов при различном положении колесной нагрузки на конструкции. То есть важно учитывать в модели прохождение схемы сосредоточенных сил от колес локомотива и вагонов.

В правой части выражения (2), согласно нормам проектирования, допустимые напряжения $\sigma_{\text{допуст}}$ определяются путем умножения расчетного сопротивления стали на понижающий коэффициент γ_w :

$$\sigma_{\text{допуст}} = \gamma_w \cdot R_y \cdot m, \quad (3)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали; m – коэффициент условий работы; γ_w – коэффициент понижения расчетного сопротивления стали за счет усталости, который определяется по следующей зависимости:

$$\gamma_w = \frac{1}{\zeta \cdot \vartheta \cdot [(\alpha\beta \pm \delta) - (\alpha\beta \mp \delta)\rho]} \leq 1, \quad (4)$$

где α , δ – коэффициенты, учитывающие марку стали и не стационарность нагружения; β – эффективный коэффициент концентрации напряжений; ρ – коэффициент асимметрии цикла при переменных нагружениях; ζ – коэффициент, равный 1,0 для железнодорожных мостов; ϑ – коэффициент, зависящий от длины загрузки линии влияния при определении переменных напряжений.

В выражении (4) основным параметром отвечающим за снижение расчетного сопротивления стали R_y , из-за наличия различных конструктивных форм сварных элементов, является коэффициент β . Он определяется экспериментальным путем в лабораторных условиях. Образцы, используемые для получения значений этого коэффициента имели обобщенные формы конструктивных элементов и они испытывались при простых видах нагружения, а именно при осевом растяжении-сжатии или изгибе [6-8]. В рамках нормативного расчета допускается, что все элементы мостов, испытывающие переменные воздействия, будут подвержены простому виду нагружения, исключая возможность возникновения местных дополнительных силовых факторов.

Нормативная модель расчета на усталость автодорожных мостов так же основывается на анализе общей нагруженности элементов. Согласно условию (2) действующие размахи переменных номинальных напряжений $\Delta\sigma_i$ в элементе не должны превышать ограниченный размах переменных напряжений $\Delta\sigma_D$ при заданном числе циклов нагружения. При этом размахи $\Delta\sigma_D$ назначаются исходя из расчетных кривых усталости выраженных в тех же номинальных напряжениях.

Постановка расчета мостов в условиях общей нагруженности элементов по номинальным

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

напряжениям вполне удовлетворяет требованиям обеспечения несущей способности элементов конструкций по прочности и устойчивости. Однако не во всех случаях обеспечивает сопротивление усталости элементов сварных узлов. Трещины усталости зарождаются в локальных зонах узлов, где возникают переменные местные дополнительные напряжения от сосредоточенной передачи нагрузок или из-за относительных перемещений (деформаций) отдельных элементов. Поэтому, расчет на усталость должен выполняться не по номинальным напряжениям, а локальным, которые учитывают особенности местного нагружения элементов во взаимосвязи с принятыми формами сварных узлов.

Таким образом, представляется актуальным совершенствование модели расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций с более полным учетом компонентов напряженно-деформированного состояния его элементов в условиях переменных эксплуатационных воздействий. В основу совершенствования модели должен быть положен расчетный анализ с использованием метода конечных элементов.

Цель

Целью данной работы является разработка и обоснование новой модели расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций по локальным напряжениям на основе использования метода конечных элементов.

Методика

Современное развитие модели расчета сварных узлов, как железнодорожных, так и автомобильных мостов на усталость, должно основываться на едином подходе. В связи с тем, что наиболее точный расчет должен выполняться с учетом действительной переменной нагруженности элементов, следует учитывать два типа напряжений – номинальные и локальные. Номинальные напряжения следует рассматривать, когда элемент подвержен только лишь общей нагруженности. Локальные напряжения в зоне сварного соединения, рассматриваются в случае когда элемент, помимо общей нагруженности, подвержен местным дополнительным факторам, приводящим к появлению местных дополнительных напряжений.

Для нахождения значений левого и правого условия (2) должны решаться четыре задачи:

1. Разработка расчетной модели мостовой конструкции для исследования общей и местной нагруженности элементов сварного узла;

2. Назначение расчетных схем нагружения конструкции подвижными нагрузками и определение величины и повторяемости переменных напряжений в потенциально опасных зонах (левая часть условия (2));

3. Назначение расчетных характеристик сопротивления усталости, ограничивающих действия возможных переменных напряжений в период эксплуатации конструкции (правая часть условия (2));

4. Выполнение сравнения левой и правой части условия (2) и определение расчетного срока службы конструкции.

Ниже, на примере расчета на усталость сварных узлов железнодорожных мостов, описывается методика выполнения описанных выше задач для расчета по локальным напряжениям.

Особенностью решения первой задачи является то, что в процессе деформации элементов узла, в зонах сварных соединений, возникает объемное НДС. Оно характеризуется: деформациями элементов в виде растяжения-сжатия, изгиба и кручения, а так же изменением размеров сечения элементов в результате их поперечной деформации (в соответствии с эффектом Пуассона). Результаты различных исследований [9-11] в которых проводилось сравнение местного НДС конечно-элементных моделей сварных узлов, с аппроксимацией различными типами элементов (оболочечными и трехмерными), с натурными экспериментами, показывают, что наиболее точно выявить локальный характер распределения напряжений удастся именно с использованием трехмерных конечных элементов (КЭ). Таким образом, для расчета местного НДС, сварные узлы мостовых конструкций должны быть представлены именно трехмерными КЭ (рис. 5).

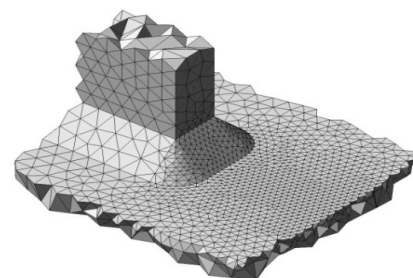


Рис. 5. Пример аппроксимации узла конструкции в зоне сварного соединения трехмерными КЭ

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В свою очередь, возникают затруднения при использовании трехмерных КЭ при описании ими всей расчетной модели моста, так как такая подробная аппроксимация конструктивных элементов приводит к значительной длительности вычислений. Выполнять расчеты с такой подробной аппроксимацией всех узлов и элементов не представляется возможным.

В этой связи, применительно к расчету локальных напряжений в сварных узлах мостовых конструкций, была разработана методика построения расчетной модели из разнотипных КЭ с их объединением абсолютно-жесткими телами (АЖТ) в виде плоских сечений [12]. Для анализа действительной работы исследуемого сварного узла, используя стандартную библиотеку КЭ, создается единая пространственная расчетная модель всей конструкции, в которой исследуемый сварной узел аппроксимируется трехмерными КЭ, фрагмент конструкции включающий узел – оболочечными КЭ, а основная часть конструкции пространственными стержневыми КЭ (рис. 6). При этом АЖТ в виде плоских сечений обеспечивает передачу наследственной информации о НДС от одного фрагмента конструкции к другому.

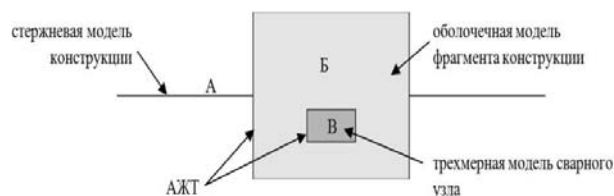


Рис. 6. Схема модели конструкции с АЖТ для расчета локальных напряжений в сварных узлах: А – фрагмент из стержневых КЭ; Б – фрагмент из оболочечных КЭ; В – фрагменты из трехмерных КЭ

Результаты сопоставительного численного анализа представленной модели с данными расчета моделей с полноразмерной аппроксимацией элементов конструкции трехмерными КЭ, в рамках верификационных тестов, подтверждают возможность применения такой модели при расчете локальных переменных напряжений в сварных узлах конструкций. В расчетной модели АЖТ в виде плоских сечений обеспечивает адекватную передачу внешних силовых воздействий от фрагмента к фрагменту и дает возможность исследовать локальное распределение напряжений в зоне сварных соединений с учетом пространственной работы всей конструкции.

Решение второй задачи, связанное с назначением схем нагружения мостов подвижными нагрузками, заключается в поэтапном исследовании как общей, так и местной нагруженности элементов конструкции.

Известно, что нормативная подвижная нагрузка СК создавалась исходя из конкретных перспективных схем подвижных экипажей на основе прогноза развития подвижного состава [13, 14]. На перспективу, для колеи 1524 мм, были намечены 8-осный электровоз с осевым давлением 33 тс и однородные грузовые 6 и 8-осные вагоны с осевым давлением 30 тс (рис. 7), с интенсивностью движения 100 поездов в сутки.

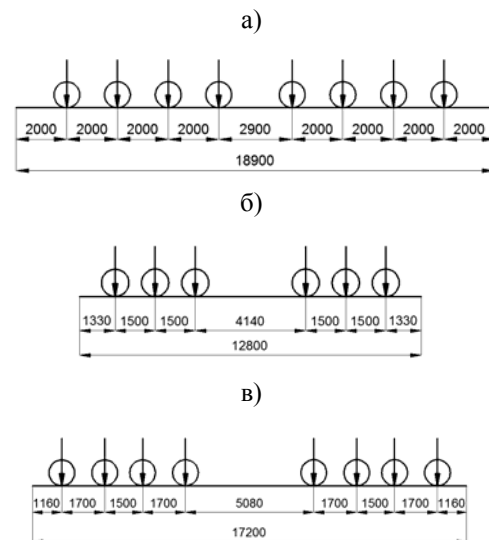


Рис. 7. Схемы экипажей нормативной подвижной нагрузки С-14:

- а – 8-осный электровоз; б – 6-осный грузовой вагон;
в – 8-осный грузовой вагон

В последующем, для упрощения процедуры загрузки, данные схемы были переведены в эквивалентные равномерно распределенные нагрузки. Исходя из этого, не имеется ограничений в применении приведенных схем локомотива и вагонов для расчета на усталость мостов в условиях местного воздействия колес вагонов, при проектировании новых мостов.

В свою очередь, согласно [8], при создании действующего нормативного метода расчета на усталость, предусмотрели то, что мосты рассчитываются на нагрузку подвижного состава с учетом перспективы, а работают они на усталость в течении ряда лет при меньших нагрузках, не достигающих нормативных значений. За это отвечает коэффициент режима нагрузки

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ξ и он учитывается при определении коэффициента α в выражении (4).

$$\alpha = \frac{R_u}{2 \cdot \kappa_\rho \cdot \sigma_{-1} \cdot \xi}. \quad (5)$$

В выражении (5) κ_ρ – коэффициент неоднородности материала, σ_{-1} – амплитуда ограниченных напряжений цикла при симметричном цикле нагружения ($\rho = -1$) на базе 2×10^6 циклов нагружения, ξ – коэффициент режима нагрузки, R_u – временное сопротивление стали. Согласно [7, 8], коэффициент ξ находится в диапазоне 1,4...1,5 и в нормах проектирования заложена величина 1,42, которая повышает коэффициент γ_w . Важно отметить, что в выражении (5) все параметры, за исключением ξ , относятся к расчетному пределу выносливости сварного соединения. Если принять в рассмотрение сварное соединение из низколегированной стали, тогда в зависимости от коэффициента асимметрии цикла ρ от $-1,0$ до $1,0$, коэффициент ξ повышает расчетный предел выносливости соединения от $1,0$ до $1,42$, что можно наблюдать на полученном графике рис. 8.

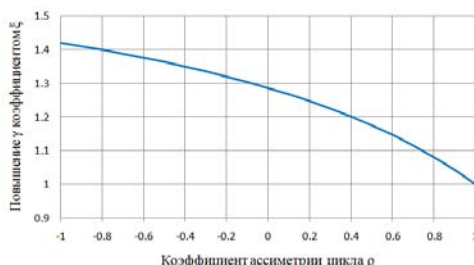


Рис. 8. Повышение коэффициента γ_w коэффициентом ξ в зависимости от различной асимметрии цикла действующих переменных напряжений

Отсюда следует, что коэффициент ξ можно отдельно использовать в правой части условия (2) при расчете на усталость элементов мостов.

В расчетах на усталость эксплуатируемых железнодорожных мостов, для определения их расчетного ресурса с учетом накопления усталостных повреждений в элементах, следует учитывать фактические схемы поездов, которые проезжают на конкретном железнодорожном участке. Либо же учитывать эталонный поезд с определенной схемой локомотива и грузовых вагонов.

В рамках расчета общей переменной нагруженности элементов моста составляется упрощенная расчетная модель, с аппроксимацией пространственными стержневыми КЭ основных несущих элементов. Выполняется статическое нагружение назначенной схемой поезда в соответствии с очертаниями линий влияния общих усилий в сечении элемента, либо динамический расчет в котором прокатывается схема поезда вдоль моста, с последующим анализом осциллограмм переменных напряжений. Результаты данного расчета позволят проанализировать какое положение схемы вагонов поезда могут занимать в пределах моста для последующего выявления максимальных и минимальных локальных переменных напряжений.

Для исследования закономерностей изменения местного НДС элементов сварного узла и выявления дополнительных напряжений, осуществляется местное нагружение элементов конструкции. Для этого строятся линии влияния местных деформаций (выгибов) элементов (см. рис. 1 и 2) и локальных напряжений путем прокатывания единичной нагрузки по модели с АЖТ (см. рис. 6). По результатам этого осуществляется местное приложение нагрузки от колес вагонов и определяются локальные максимальные и минимальные переменные напряжения в зоне сварных соединений. О том, в каком именно месте определяются локальные напряжения в сварном узле, пойдет речь далее.

Решение третьей задачи сводится к назначению расчетных характеристик сопротивления усталости (ХСУ) исследуемого сварного узла, то есть назначению $\sigma_{\text{допуст}}$ в правой части условия (2).

Местные дополнительные напряжения оказывают влияние на формирование зоны предразрушения в потенциально опасных местах сварных узлов, поэтому расчет на усталость следует выполнять с их учетом. Для учета местных дополнительных напряжений расчетные переменные напряжения (левая часть условия (2)) и расчетные ХСУ (правая часть условия (2)) должны выражаться в одних и тех же локальных напряжениях. В инженерной практике расчета принято, что «горячей точкой» в зоне предразрушения качественных сварных соединений (где зарождаются макротрещины), является линия перехода от металла шва к основному металлу. Особенностью напряжений в этой точке (локальных напряже-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ний) является то, что они зависят от разнообразия возможных геометрических и физико-механических особенностей сварных соединений. Сварной шов может иметь разнообразную форму поверхности (близкая к плоской, выпуклая, вогнутая и др.), различные соотношения катетов шва, различные радиусы закругления в зоне перехода от металла шва к основному металлу [6, 15, 16]. Так же, в зоне линии сплавления шва, имеет место неоднородность механических свойств основного металла, зависящая от режимов сварки, а так же различные уровни остаточных напряжений. Такие факторы относятся к технологическим и их значения имеют определенный разброс, что носит во многом случайный характер. То есть теоретически, или практически, определить фактическое напряженное состояние по линии сплавления шва затруднительно, из-за отмеченных неопределенностей.

В связи с этим были проведены исследования связанные с установлением расстояния от линии сплавления шва удовлетворяющее условиям, при которых геометрические и физико-механические особенности шва перестают сказываться на величину локальных напряжений. При этом удаление от шва было бы достаточным для учета влияния местных дополнительных напряжений на долговечность. Установление такой точки основывалось на численных исследованиях закономерностей распределения локальных напряжений в сварных соединениях, оформленных в соответствии с техническими условиями на изготовление мостовых конструкций [3, 5]. Результаты исследования закономерностей в наиболее распространенных типах сварных соединений (тавровые, крестообразные и с приваркой продольных ребер) показали, что на удалении от линии сплавления шва более $0,17t$ (t – толщина основного металла), различные геометрические формы шва практически не влияют на величину локальных напряжений (рис. 9).

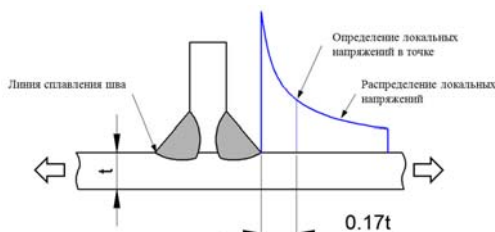


Рис. 9. Схема определения локальных напряжений в зоне сварного соединения

Установленное положение позволило назначить теоретические коэффициенты концентрации напряжений $\alpha_{0,17t}$, для разных групп сварных соединений, с помощью которых может осуществляться перевод кривых усталости из номинальных напряжений в локальные. Перевод кривых выполняется путем умножения теоретического коэффициента концентрации напряжений $\alpha_{0,17t}$ на ограниченный размах напряжений, выраженный в номинальных напряжениях $\Delta\sigma_D$ при заданном числе циклов нагружения, то есть $\sigma_{\text{допуст}} = \alpha_{0,17t} \times \Delta\sigma_D$. Значения σ_D для разных групп элементов могут использоваться по данным действующих норм проектирования мостов. В таком случае уравнение расчетной кривой усталости, выраженной в локальных напряжениях $\sigma_{0,17t}$, примет вид:

$$N_i = N_D \times \left(\frac{\alpha_{0,17t} \Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{0,17t}} \right)^m, \quad (6)$$

где N_i – число циклов до образования трещины усталости в узле при действующем размахе локальных переменных напряжений $\Delta\sigma_{0,17t}$. В этом случае кривая усталости только лишь эквидистантно сместится вверх (рис. 10), так как углы наклонов кривой в логарифмической шкале остаются неизменными. В расчете на усталость локальные переменные напряжения $\sigma_{0,17t}$ учитывают концентрацию напряжений, вызванную различными формами сварных узлов, а кривые усталости учитывают, отмеченные выше, неопределенности связанные с формой сварного шва и физико-механической неоднородностью материала.

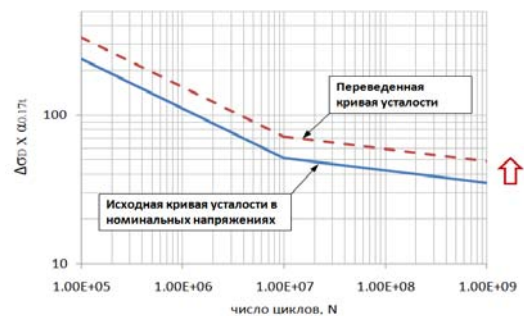
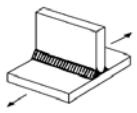
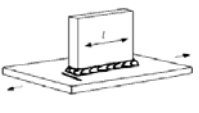


Рис. 10. Смещение кривой усталости вверх при переводе ее из номинальных напряжений в локальные $\sigma_{0,17t}$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Значения предлагаемых коэффициентов $\alpha_{0,17t}$ для тавровых (крестообразных) и с приваркой продольных ребер сварных соединений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_{0,17t}$ для пересчета ХСУ из номинальных напряжений в локальные	
Тип сварного соединения	Значения коэффициентов $\alpha_{0,17t}$
 Тавровое и крестообразное соединение	1,1
 С приваркой продольных ребер	1,4 для $l \leq 100$ мм 1,25 для $l > 100$ мм

Данные типы соединений составляют основу различных сварных узлов мостовых конструкций с угловыми швами, в которых трещины усталости зарождаются наиболее часто. В этой таблице, применительно к тавровым соединениям, коэффициент $\alpha_{0,17t}$ составляет 1,1. Для соединений с приваркой продольного ребра, коэффициент $\alpha_{0,17t}$ составляет 1,4, однако, в случае, когда длина ребра более 100мм, коэффициент следует снижать на 11 %, в результате чего он составляет 1,25.

В условиях действия сложного характера нагружения элемента, в котором при каждом цикле нагружения одновременно проявляются комбинация действия нормальных и касательных напряжений, в расчете следует оперировать потоками главных напряжений:

$$\sigma_{0,17t,1,2} = \frac{\sigma_{0,17t,x} + \sigma_{0,17t,y}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{0,17t,x} - \sigma_{0,17t,y})^2 + 4 \cdot \tau_{0,17t,xy}^2} \quad (7)$$

В инженерной практике принято, что, в случае, когда траектория действия главных напряжений отклоняется от оси перпендикулярной к

линии сплавления шва, в зоне образования трещины, на угол $\varphi = \pm 60^\circ$ (рис. 11), кривая усталости может приниматься как для соединения испытанного при действии усилий под углом $\varphi = 0^\circ$ [17].

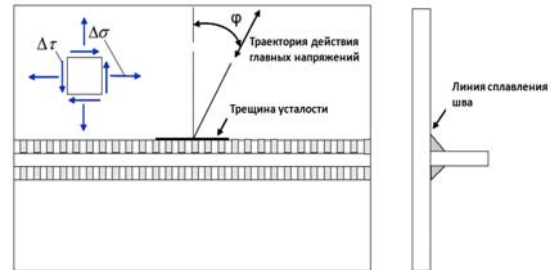


Рис. 11. Схема определения кривой усталости для сварного соединения при траектории действия главных напряжений под углом $\varphi = \pm 60^\circ$

Проведенный сопоставительный анализ результатов расчета долговечности сварных узлов по локальным напряжениям $\sigma_{0,17t}$ с результатами лабораторных испытаний образцов-фрагментов различных конструктивных форм в условиях простого и сложного НДС подтвердил возможность применения предлагаемой модели назначения расчетных ХСУ. Локальные напряжения $\sigma_{0,17t}$ позволяют учесть влияние местных дополнительных напряжений и установить долговечность узлов в приемлемые сроки.

Заключительной (четвертой) задачей методики является сравнение левой и правой части условия (2). Применительно к проектируемым мостовым конструкциям расчет на усталость сварных узлов по локальным напряжениям предлагается выполнять на основе выражения:

$$\Delta\sigma_{0,17t} \leq \frac{\xi \cdot \alpha_{0,17t} \cdot \Delta\sigma_D \cdot m}{\gamma_r} \quad (8)$$

где γ_r – коэффициент надежности по ответственности. Коэффициенты m и γ_r назначаются нормами проектирования. В случае учета накопления усталостных повреждений в сварном узле, следует использовать линейное суммирование повреждений в виде:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = D \quad (9)$$

где n_i – число циклов, соответствующее размаху действующих локальных переменных напряже-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ний $\Delta\sigma_{0,17ii}$ при нестационарному навантаженні; N_i – число циклів до утворення тріщини втоми при діючому размаху локальних змінних напружень. Суммарна величина відносительних пошкоджень в правій частині вираження (9), для зварних з'єдинень з високим рівнем залишкових напружень, може прийматися рівною $D = 0,5$ [17].

Нижче приводиться застосування запропонованої моделі розрахунку зварних вузлів на втоми по локальним напруженням на прикладі залізнично-дорожнього болтосварного решітчастого пролетного строення (ТП № 690) пролетом 55 м [18]. В конструкції пролетного строення досліджуваным являється вузол прикріплення поперечних ребер жорсткості к стенці продольної балки балочної клітки проезжої частини в першому участку (рис. 12, а). Даний умісток включає в себе дві продольні симетричні двутаврові балки довжини 5500 мм з поясами

300×16 мм і стінкою 848×10 мм. К стінкам балок, при допомозі зварки, куговими швами з двох сторін прикріпляються поперечні ребра жорсткості товщиною 10 мм, з вирізами на кінцях. Кінці ребер примыкають к верхньому поясу через «сухарики». Продольні балки прикріпляються високопрочними болтами к поперечним балкам, розміри поясів і стінки котрих складають 320×32 мм і 816×12 мм. Продольні балки об'єднуються між собою системою поперечних і горизонтальних зв'язей із прокатних кугольків 90×90×9 мм. В конструкції балочної клітки розглядаємый вузол розположен прихмерно в третій пролету продольної балки (см. рис. 12, б). В вузлі розміри катетів кугового шва складають 10 мм, а відношення катетів 1:1. Відстань від краю початку вирізу в ребрі до низу верхнього поясу складає 164 мм (см. рис. 12, в).

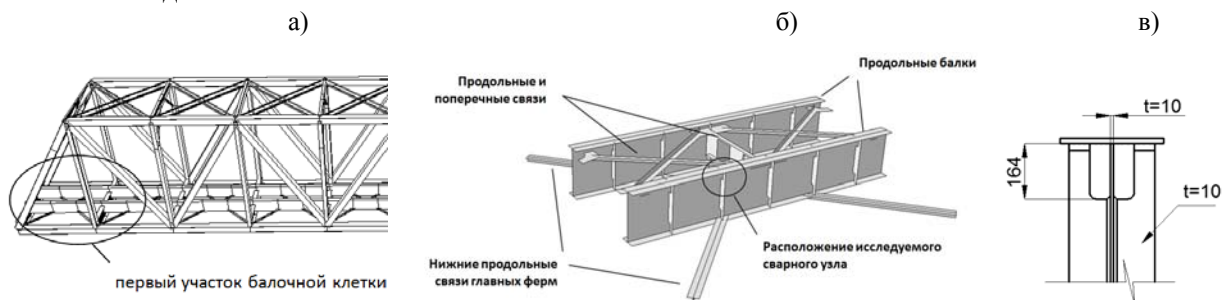


Рис. 12. Расположение рассматриваемого участка балочной клетки решетчатого пролетного строения (а), расположение исследуемого сварного узла (б) и его основные размеры (в)

Для навантаження елементів зварного вузла експлуатаційної подвижної навантажкою була прийнята схема еталонного поезда на основі рекомендацій НІІ мостів, ЛІІЖТ і НІІЖТ [19]. Згідно рекомендаціям, еталонний поїзд прийнято назначать состоящим из локомотива серии ВЛ с осевым давлением $P = 270$ кН и 30 однотипных 4-осных грузовых вагонов с осевым давлением $P = 250$ кН. Интенсивность движения составляет 100 поездов в сутки.

Для дослідження загальної навантаженості пролетного строення, при проходження еталонного поезда, створювалася стержневая конечно-элементная модель. В свою очередь для дослідження місотної навантаженості зварного вузла створювалася модель із різнотипних КЭ с АЖТ згідно схемі на рис. 6. Для цього, в першому участку балочної клітки (см. рис. 12, а), основні несучі елементи ап-

проксимувались оболочечными КЭ (рис. 13, а), при цьому досліджуємый вузол – тріхмерними КЭ (см. рис. 13, б). Для уміту адекватної передачі тиснення від колес тележки вагона на елементи, во фрагменті із оболочечных КЭ умітувались дерев'яні поперечини із тріхмерних КЭ.

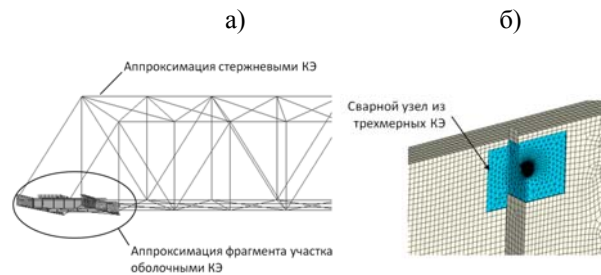


Рис. 13. Расчетная модель пролетного строения с АЖТ: а – фрагмент из оболочечных КЭ; б – сварной узел из трехмерных КЭ

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Практика експлуатації даного типу пролетних строєний в умовах інтенсивного руху вантажного залізничного транспорту показує, що тріщини втоми в сварних вузлах зароджуються в перші десятиліття після початку експлуатації [1]. Аналіз місць утворення тріщин показує, що вони зароджуються по лінії сплавлення шва, практично в межах початку і кінця його скруглення (рис. 14, а).

Поэтому локальные переменные напряжения $\Delta\sigma_{0,17t}$ рассчитывались на расстоянии $0,17t$ от линии сплавления шва с двух сторон стенки, согласно схеме на рис. 14, б).

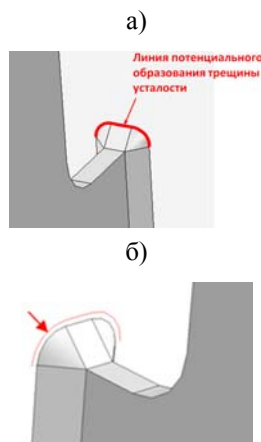


Рис. 14. Линия потенциального образования трещины усталости в узле (а) и схема измерения локальных напряжений по линии на расстоянии $0,17t$ от линии сплавления шва с обеих сторон стенки балки

Результаты численного анализа нагруженности пролетного строения при прохождении эталонного поезда показали, что характер изменения величины и повторяемости общих и местных переменных напряжений имеет существенное различие. На рис. 15 приведена осциллограмма продольных номинальных напряжений в верхнем и нижнем поясе балки при прохождении эталонного поезда.

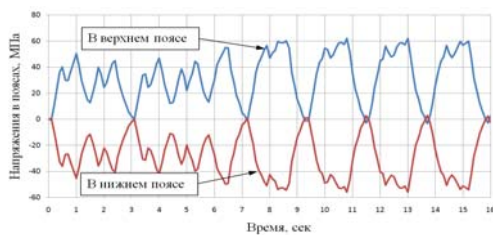


Рис. 15. Осциллограммы переменных номинальных напряжений в поясах продольной балки при прохождении эталонного поезда

Максимальные напряжения в исследуемом сечении балки от общей нагруженности возникают при положении колеса тележки вагона, как показано на рис. 16, а. При этом минимальные напряжения возникают при положении середины вагона поезда над серединой продольной балки (см. рис. 16, б).

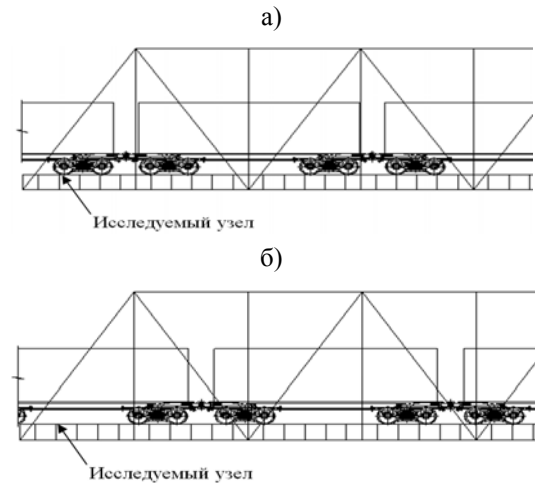


Рис. 16. Положение схемы подвижной нагрузки для получения:

- а – максимальных переменных напряжений в узле;
- б – минимальных переменных напряжений в узле

Результаты численных исследований местной переменной нагруженности сварного узла в продольной балке показывают, что положение колеса тележки вблизи поперечного ребра приводит к местному выгибу стенки у выреза и появлению дополнительных напряжений.

Данный выгиб возникает от местного кручения пояса балки, что вызывается поперечным изгибом мостового бруса [1]. Максимальный поперечный выгиб стенки возникает при положении колеса на расстоянии около 200 мм от оси поперечного ребра в сторону середины поперечной балки. На рис. 17 представлены максимальные поперечные деформации стенки балки у выреза в поперечных ребрах жесткости.

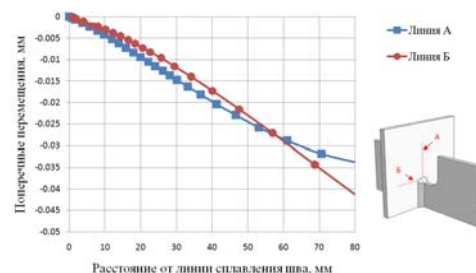


Рис. 17. Поперечные перемещения стенки балки у выреза в поперечных ребрах жесткости

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

На рис. 18 приведен характер распределения местных поперечных напряжений с наружной и внутренней стороны стержня балки у выреза в ребрах, вызванных ее максимальным местным выгибом из плоскости. Из данных закономерностей напряжений видно, что характер распределения напряжений по высоте существенно различается.

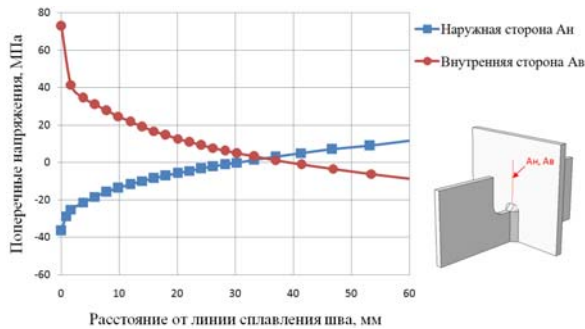


Рис. 18. Характер распределения местных поперечных напряжений в сварном узле

С наружной стороны стенки, вблизи линии сплавления шва, возникают сжимающие напряжения, а при удалении от сварного шва возникают растягивающие напряжения. С внутренней стороны стенки поперечные напряжения так же имеют разные знаки по высоте, при этом вблизи линии сплавления шва возникают растягивающие напряжения, которые примерно в два раза превышают напряжения с наружной стороны стенки по модулю.

Также существенное расхождение наблюдается и в закономерностях распределения местных продольных напряжений в зоне сварного шва (рис. 19)

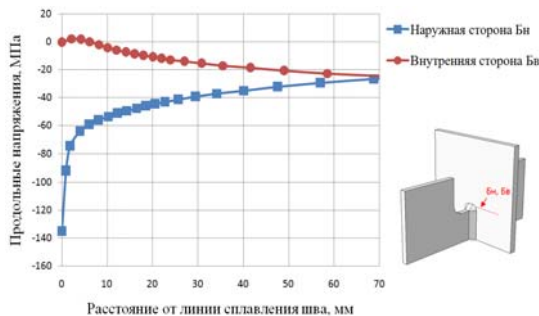


Рис. 19. Характер распределения местных продольных напряжений в сварном узле

С наружной стороны стенки возникают максимальные сжимающие напряжения, которые на удалении от шва постепенно снижаются. При этом с внутренней стороны стенки, у линии

сплавления шва, возникают незначительные растягивающие напряжения и с удалением от сварного шва проявляются сжимающие напряжения с постепенным их увеличением.

Представленное выше наглядно демонстрирует, что местная нагруженность сварного узла существенно зависит от положения колеса тележки вагона в пределах пролетного строения. По результатам анализа локальных напряжений $\sigma_{0,17t}$ (согласно схеме на рис. 14, б) были выявлены потенциально опасные места образования трещины в сварном узле. Первая точка располагается с наружной стороны балки, в месте действия максимальных продольных сжимающих напряжений. Вторая точка располагается с внутренней стороны стенки балки, в месте действия максимальных поперечных растягивающих напряжений. Результаты расчета долговечности сварного узла в установленных точках показали, что к возможному зарождению трещин усталости приводят именно сжимающие напряжения. На рис. 20 приведена кривая усталости выраженная в локальных напряжениях для сварного соединения с приваркой поперечных ребер и полным проплавлением сварного шва ($\Delta\sigma_{0,17tD} = 88$ МПа при 2×10^6 циклов нагружения). На кривой усталости представлен размах действующих главных сжимающих напряжений, который составляет $\Delta\sigma_{0,17t} = 82,6$ МПа.

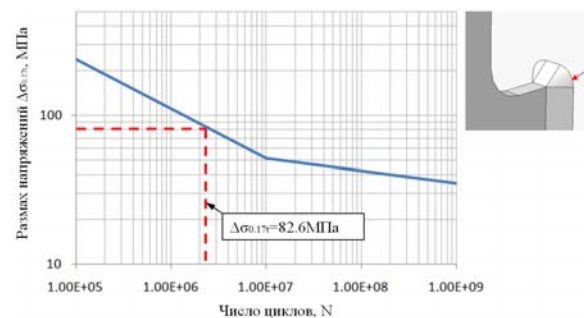


Рис. 20. Кривая усталости сварного узла выраженная в локальных напряжениях $\sigma_{0,17t}$ для потенциально опасной зоны с наружной стороны стенки балки

При данном уровне расчетных переменных напряжений число циклов, до образования трещины усталости, составляет примерно $2,4 \times 10^6$. С учетом того, что максимальный размах переменных напряжений в узле возникает

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

при прохождении каждой пары смежных тележек вагона, и рассмотрении прохода по пролетному строению 100 эталонных поездов в сутки, каждые 365 дней в году, появление трещины усталости ожидается примерно через 2 года эксплуатации.

На рис. 21 приведена кривая усталости выраженная в локальных напряжениях для сварного соединения с приваркой продольных ребер и полным проплавлением сварного шва ($\Delta\sigma_{0,17t} = 100$ МПа при 2×10^6 циклов нагружения).

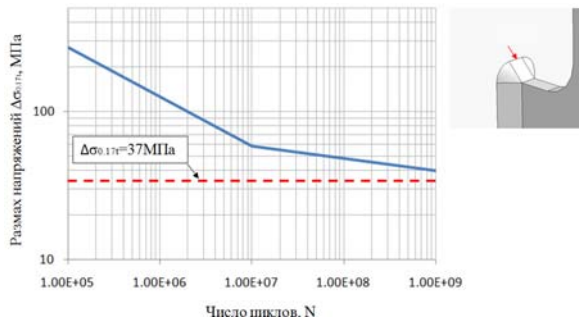


Рис. 21. Кривая усталости сварного узла выраженная в локальных напряжениях $\sigma_{0,17t}$ для потенциально опасной зоны с внутренней стороны стенки балки

На кривой усталости представлен размах действующих главных растягивающих напряжений, который составляет $\Delta\sigma_{0,17t} = 37$ МПа.

Как видно из рис. 21, уровень напряжений ниже расчетной кривой усталости, в результате трещины в этом месте не ожидается.

Такая оценка ресурса конструкции предупреждает о зарождении трещины усталости в приемлемые сроки и обосновывает недостаток принятого конструктивного решения сварного узла. При этом расчет на основе понижающего коэффициента γ_w (4) не отражает исчерпание несущей способности сварного узла по выносливости, даже с учетом нагружения пролетного строения нормативной подвижной нагрузкой С14.

Результаты

1. Нормативный метод расчета мостов на усталость не всегда позволяет учесть действительную работу элементов мостов и установить потенциально опасные места в их узлах. Это связано с тем, что не учитывается влияние местных дополнительных напряжений в эле-

ментах, вызванных особенностями их конструктивных форм во взаимосвязи с местным нагружением.

2. Для учета местных дополнительных силовых факторов в узлах следует выполнять расчет по локальным напряжениям в зонах сварных соединений, так как потенциально опасные зоны сосредотачиваются именно в тех местах.

3. Расчет на усталость по локальным напряжениям предлагается выполнять по главным напряжениям, определяемым на расстоянии $0,17t$ (t – толщина основного металла) от линии сплавления шва. При этом расчетные характеристики сопротивления усталости следует назначать на основе пересчета кривых усталости из номинальных напряжений в локальные $\sigma_{0,17t}$.

4. Для учета действительной нагруженности узлов в расчете следует оперировать не равномерно распределенными подвижными нагрузками, как принято в нормах, а схемами реальных поездов, отражающих группу сосредоточенных сил от колес локомотива и вагонов. Важно устанавливать закономерность изменения величины и повторяемости напряжений в элементах от местного положения колес поезда на мосту.

5. Расчет локальных напряжений в сварных узлах следует рассчитывать на основе модели узла с аппроксимацией их трехмерными КЭ. Для отражения адекватной нагруженности узла, с учетом пространственной работы всей конструкции, при различных схемах положения подвижной нагрузки, расчетную модель рекомендуется описывать фрагментами из разнотипных КЭ, с их объединением АЖТ в виде плоских сечений.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана и обоснована новая модель расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций по локальным напряжениям. Данная модель позволяет повысить точность расчета ресурса мостов учитывая особенности конструктивного оформления элементов во взаимосвязи с их местным НДС. Это позволяет оптимизировать конструктивные формы элементов мостов на основе ранжирования по долговечности сварных узлов при многовариантной проработке, что весьма актуально в целях экономии материалов на стадии проектирования мостов.

Выводы

Описана методика расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций по локальным напряжениям. Приведены основные задачи методики и их решение. На примере железнодорожного пролетного строения моста выполнен расчет его ресурса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мости: конструкції та надійність [Текст] / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. М. Корнієв [і ін.]; за ред. В. В. Панасюка і Й.Й. Лучка. – Львів : Каменяр, 2005. – 989 с.
2. Chitoshi, Miki Retrofitting Engineering for Fatigue Damaged Steel Structures [Text] / Miki Chitoshi. – Doc.IIW-XIII-2284r1-09. Version 2010.
3. Корнієв, М. М. Сталеві мости. Теоретичний і практичний посібник з проектування. У двох томах [Текст] / М. М. Корнієв – Київ : Вид-во «Академпрес», 2010. – Т. 1. – 532 с.
4. John, W. Fisher Fatigue Design: Its past, what it is today and it is future [Text] / John W. Fisher. – MCEER . October 4, 2010.
5. ДБН 8.2.3-26:2010. Видання офіційне. Мости і труби сталеві конструкції. Правила проектування. Київ. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 2011.
6. Труфяков, В. И. Усталость сварных соединений [Текст] / В. И. Труфяков. – Київ : Наук. думка, 1973. – 216 с.
7. Дучинский, Б. Н. Выносливость элементов сварных мостовых конструкций при переменных и знакопеременных напряжения [Текст] / Б. Н. Дубинский // Исследования прочности и долговечности сварных мостовых конструкций : Труды ЦНИИС. – Москва : Трансжелдориздат, 1956. – Вып. 20. – С. 68-162.
8. Евграфов, Г. К. Расчеты мостов по предельным состояниям [Текст] / Г. К. Евграфов, Н. Б. Лялин. – Москва : Трансжелдориздат, 1962. – 336 с.
9. Jae-Myung, Lee Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures [Text] / Lee Jae-Myung, Jung-Kwan Seo, Myung-Hyun Kim, Sang-Beom Shin, Myung-Soo Han, June-Soo Park, and Mahen Mahendran. – Inter J Nav Archit Oc Engng (2010) 2:200~210. DOI 10.3744/JNAOE.2010.2.4.200.
10. Fricke, Wolfgang Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSOs and Ships Based on Round-Robin FE Analyses [Text] / Wolfgang Fricke // Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, June 17-22, 2001.
11. Pirsic, T. Thermographic Analysis of Stress Distribution in Welded Joints [Text] / T. Pirsic, L. Krstulovic-Opara, Z. Domazet. – EPJ Web of Conferences 6, 07004 (2010).
12. Кирьян, В. И. Расчет локальных напряжений в зонах сварных соединений крупногабаритных пространственных конструкций. Автомат. Сварка [Текст] / В. И. Кирьян, В. И. Дворецкий, М. Г. Мальгин. – 2012. – № 4. – С. 3-7.
13. Вопросы проектирования железнодорожных мостов [Текст] / Под ред. И. И. Казея / Труды ВНИИ трансп. стр-ва. – Москва : Трансжелдориздат, 1962. – Вып. 46. – 168 с.
14. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом [Текст] / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд [и др.] ; под. ред. Н. Г. Бондаря. – Москва : Транспорт, 1984 – 272 с.
15. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности [Текст] / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев ; под. ред. Б. Е. Патона – Москва : Машиностроение 1996. – 576 с.
16. Труфяков, В. И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках [Текст] / В. И. Труфяков. – Київ : Наук. думка, 1990. – 256 с.
17. Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components [Text] / A. Hobbacher. – International Institute of Welding, doc. XIII-1965r14-03/XV-1127r14-03. NY, 2009.
18. Типовой проект № 3.501-30. Металлически пролетные строения с ездой понизу пролетами 33-110 м под железную дорогу со сварными элементами и монтажными соединениями на высокопрочных болтах для использования в северных районах. Рабочие чертежи. Пролетное строение $l = 55$ м [Текст]. – Гипротрансмост, 1968.
19. Разработка методики расчета на усталость сварных соединений и узлов пролетных строений ж.д. мостов на основе вероятностных подходов к установлению расчетных нагрузок и характеристик сопротивления усталости. Научно-исследовательская лаборатория мостовых конструкций кафедры «Мосты и туннели» Института инженеров железнодорожного транспорта [Текст]. – Новосибирск, 1989. – 15 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

М. Г. МАЛЬГІН^{1*}, К. В. МЕДВЕДЄВ^{2*}

^{1*} MIDAS Information Technology Co., Ltd. MIDAS IT Tower-Pangyo Seven Venture Valley, 633 Sampyeong-dong Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-400, Korea, тел. +82 31 789 1992, e-mail malgin@midasit.com

^{2*} Каф. «Мостів та тунелів», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел./факс +38 (044) 280 79 78, ел. пошта kvmedvediev@gmail.com

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВТОМУ ЗА ЛОКАЛЬНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Мета. Метою роботи є розробка нової моделі розрахунку зварних вузлів мостових конструкцій на втому довговічність за локальними напруженнями. **Методика.** Проведено теоретичне дослідження. Дано опис вирішення основних виконуваних задач розрахунку на втому: розробка розрахункової моделі конструкції для дослідження загального та місцевого напружено-деформованого стану елементів; призначення розрахункових схем рухомих навантажень; призначення розрахункових характеристик опору втомі; визначення розрахункового терміну служби конструкції. Наводиться приклад розрахунку ресурсу типової залізничної прогнкової будови. **Результати.** Проаналізовано основні недоліки існуючої нормативної моделі розрахунку на втому, обґрунтовано та запропоновано її розвиток. **Наукова новизна.** Розроблена та обґрунтована нова модель розрахунку на втому зварних вузлів мостових конструкцій. **Практична значимість.** Запропонована модель дозволяє підвищити точність розрахунку ресурсу мостів враховуючи особливості конструктивного оформлення елементів у взаємозв'язку з їх місцевим напружено-деформованим станом, а також дозволяє оптимізувати конструктивні форми елементів мостів.

Ключові слова: втомна довговічність; мостові конструкції; зварний вузол; метод скінчених елементів

M. MALGIN^{1*}, K. MEDVEDEV^{2*}

^{1*} MIDAS Information Technology Co., Ltd. MIDAS IT Tower-Pangyo Seven Venture Valley, 633 Sampyeong-dong Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-400, Korea, tel. +82 31 789 19 92, e-mail malgin@midasit.com

^{2*} Dep. of «Bridges and Tunnels», National Transport University, 1 Suvorova, Str., Kiev, Ukraine, 01010, tel./fax +38 (044) 280 79 78, e-mail kvmedve-diev@gmail.com

FATIGUE ANALYSIS MODEL OF BRIDGE STRUCTURES BASED ON LOCAL STRESS APPROACH

Purpose. The main purpose of this research is developing of the new model for fatigue analysis of welded joints in bridge structures based on local stress calculation. **Methodology.** Theoretical research was carried out. Solution of the main tasks of fatigue analysis was described: developing of the structure model for the global and local stress analysis in elements; assignment of the moving load schemes; assignment of the fatigue curves; fatigue life calculation. Example of fatigue analysis of railway bridge is described. **Findings.** The main disadvantages of the current method for fatigue analysis of bridge structures are described and recommendations for improvement of the method are given. **Originality.** Developed and proved the new model for fatigue analysis of the bridge welded joints. **Practical value.** Recommended model allow to increase the convergence of fatigue life calculation for bridge welded joints including the local deformed stage of elements and their structural forms. This allow to decrease the volume of materials in steel bridges.

Keywords: fatigue life; bridge structures; welded joint; finite element method

Стаття рекомендована к публікації д.т.н, проф. А. І. Лантухом-Ляценко (Україна), д.т.н., проф. В. Д. Петренко (Україна).

Поступила в редколлегию 20.08.2014.

Принята к печати 28.09.2014.