

М. Г. МАЛЬГИН, В. И. КИРЬЯН (Институт электросварки им. Е. О. Патона
НАН Украины, Киев)

РАСЧЕТ НА УСТАЛОСТЬ СВАРНЫХ УЗЛОВ ОРТОТРОПНЫХ ПЛИТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ ПО ЛОКАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

У роботі розглядається розрахунок на втому вузлів перетину подовжніх ребер жорсткості із стінкою поперечних балок ортотропних плит (ОП) проїжджої частини автодорожніх мостів. Виконано зіставлення довговічності на стадії зародження тріщин втоми, отриманої за результатами натурних втомних випробувань фрагмента ОП і прогнозованою на підставі методів номінальних і локальних напружень.

Ключові слова: ортотропна плита, автодорожній міст, проїжджа частина, довговічність, тріщини втоми, локальні напруження

В работе рассматривается расчет на усталость узлов пересечения продольных ребер жесткости со стенкой поперечных балок ортотропных плит (ОП) проезжей части автодорожных мостов по локальным напряжениям. Выполнено сопоставление долговечности на стадии зарождения трещин усталости, полученной по результатам натурных усталостных испытаний фрагмента ОП и прогнозируемой на основании методов номинальных и локальных напряжений.

Ключевые слова: ортотропная плита, автодорожный мост, проезжая часть, долговечность, трещины усталости, локальные напряжения

The aim of this paper was to examine the application of the local stress method in the fatigue life assessment of rib-to-crossbeam joints of orthotropic decks. The hot spot stress approach and the effective notch stress approach were used. The fatigue life predicted by the local and nominal stress method was compared with the experimental results.

Keywords: orthotropic deck, road-transport bridge, passing part, longevity, cracks of fatigue, local stress

Введение

Элементы конструкций металлических мостов, испытывающие переменные нагрузки, склонны к зарождению трещин усталости при сравнительно низких номинальных напряжениях [1, 2]. Определяющими факторами в данном случае являются конструктивные несовершенства пролетных строений, обуславливающие существенное повышение локальных напряжений в отдельных узлах, а также вибрацию элементов [2].

В последнее время появление усталостных трещин встречается в сварных узлах ортотропных плит проезжей части автодорожных мостов, которые, как правило, зарождаются и развиваются на раннем сроке эксплуатации [3-5]. Конструктивно ортотропная плита (ОП) состоит из трех основных элементов: лист настила; продольные ребра жесткости; поперечные балки. В процессе эксплуатации ОП подвергается сложному нагружению – осевому усилию и пространственному изгибу. Одним из наиболее повреждаемых трещинами узлов ОП является пересечение продольных ребер жесткости и поперечных балок. Как оказалось, этот узел, из-за сложного напряженно-деформированного

состояния (НДС), представляет большие затруднения для проектирования с точки зрения обеспечения выносливости. На рис. 1 показаны два наиболее распространенных типа трещин усталости, возникающих в ОП.

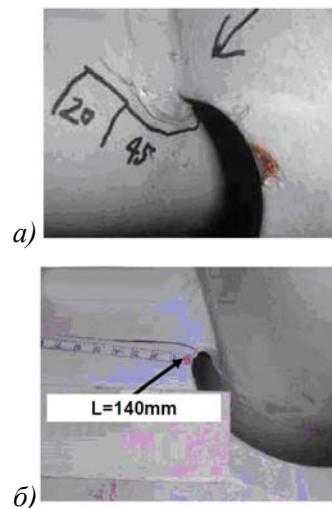


Рис. 1. Трещины усталости в узлах пересечения продольных ребер жесткости и поперечных балок ОП:
а) – в продольном ребре у кромки выреза стенки поперечной балки; б) – в стенке поперечной балки у окончания шва приварки продольного ребра

НДС узла пересечения продольного ребра жесткости и поперечной балки ОП

Для получения наглядной информации о НДС в указанном месте был выполнен численный расчет конструкции ОП. Она состояла из листа настила толщиной $t=14$ мм, подкрепленного продольными ребрами жесткости трапецевидной формы $t=8$ мм и тремя поперечными балками с вертикальной стенкой $t=10$ мм.

Для анализа пространственной работы ОП, расчетная схема состояла из оболочечных элементов с подробным разбиением в исследуемом узле. Для расчета использовались два вида нагружения. В первом случае усилие от колеса автотранспорта прикладывалось над средним продольным ребром жесткости в середине пролета (рис. 2, а), во втором – между средним и соседним продольными ребрами жесткости в середине пролета (см. рис. 2, б).

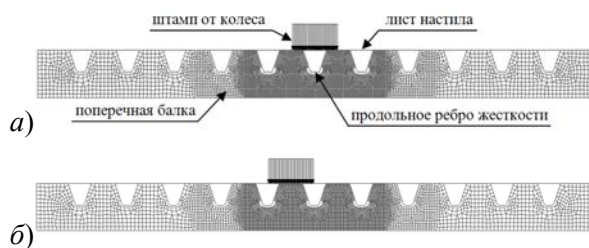


Рис. 2. Нагружение ОП усилием от автотранспорта, отражаемого штампом колеса

В результате расчета были получены напряжения и перемещения в рассматриваемых узлах ОП. На рис. 3, а показан характер деформирования узла пересечения от первой нагрузки (см. рис. 2, а). Деформирование характеризуется плоским изгибом продольного ребра жесткости и изгибом поперечной балки с учетом деформации ее стенки из плоскости (см. рис. 3, б). На рис. 3, в показано деформирование узла пересечения от второй нагрузки (см. рис. 2, б). Здесь он более сложный, где помимо основных деформаций, описанных выше, возникает кручение продольного ребра жесткости из-за эксцентрично приложенной колесной нагрузки.

В связи с тем, что продольное ребро жестко прикреплено к стенке поперечной балки, возникает его деформация (см. рис. 3, з), которая в свою очередь приводит к появлению дополнительных напряжений как в самом ребре, так и в поперечной балке. Дополнительные напряжения имеют место как раз в тех местах, где зарождаются трещины усталости (см. рис. 1). Уровень этих напряжений во многом зависит от

конструктивных решений узлов пересечения ОП, а также расположения колеса автотранспорта на проезжей части.

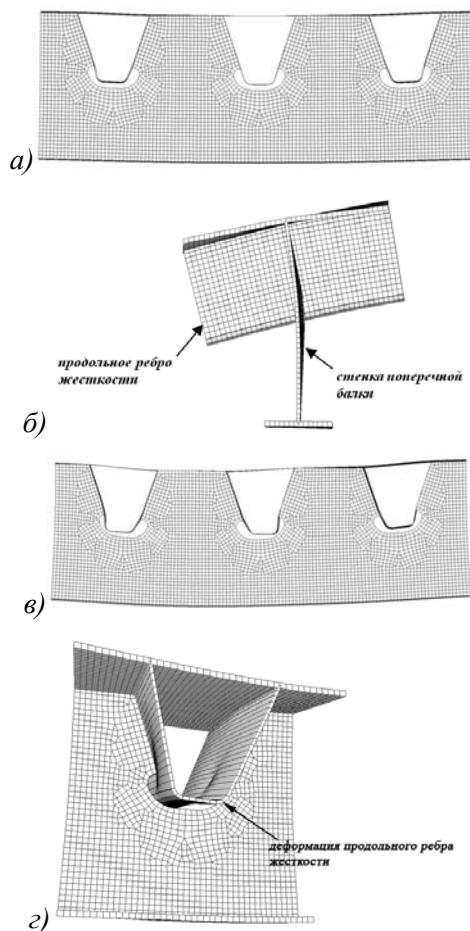


Рис. 3. Деформация узла пересечения ОП от приложенной колесной нагрузки

При расчете сварных узлов пролетных строений мостов на усталость согласно требованиям действующих мостовых норм используют метод номинальных напряжений, определяемых в расчетных сечениях элементов конструкций, в которых расположены действующие концентраторы напряжений (α_σ). Влияние α_σ на сопротивление усталости узлов учитывается с помощью экспериментальной кривой усталости, полученной по результатам испытаний образцов с соответствующими значениями α_σ и в тех же условиях нагружения. Она представляет собой зависимость между предельными уровнями номинальных напряжений (по стадии инициирования усталостной трещины) и долговечностью. При использовании такого подхода применительно к ОП встречаются сложности в связи с ограниченностью данных по сопротивлению усталости сварных узлов ОП, получен-

ных в условиях, соответствующих ее нагрузке.

Расчет на усталость сварных соединений по локальным напряжениям

На сегодняшний день существует два подхода к расчету на усталость, позволяющие подойти к учету сложного НДС в зоне концентратора. Первый из них предполагает определение напряжений в «горячей точке», а второй в эффективном концентраторе.

Определение напряжений в «горячей точке» (σ_{hs}) основано на линейной экстраполяции поверхностных напряжений в концентратор через точки расположенные на расстоянии $0,4t$ и $1,0t$ от линии сплавления шва (рис. 4). Для нелинейной экстраполяции измерение напряжений происходит на расстоянии $0,4t$, $0,9t$ и $1,4t$.

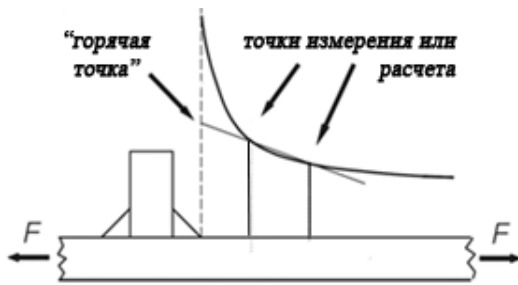


Рис. 4. Схема метода определения напряжений в «горячей точке»

Согласно рекомендаций Международного института сварки (МИС) определение необходимых напряжений может осуществляться численным методом или экспериментально с использованием тензометрии [7]. Важно при этом учесть все особенности внешнего нагружения.

Для оценки долговечности по напряжениям в «горячей точке» МИС предложены соответствующие расчетные кривые усталости для различных типов соединений с угловыми швами, испытывающих воздействие мембранных и изгибных усилий. Они получены для условий зарождения трещин усталости на лицевой поверхности пластины вблизи концентратора. В случае появления трещин в корне шва из-за неполного проплавления или отклонения от заданного зазора между кромками, данный метод не применим. Второй подход основан на расчете методом конечных элементов НДС в зонах сварных соединений, склонных к зарождению трещин усталости (корень шва, переход от металла шва к основному материалу и др.).

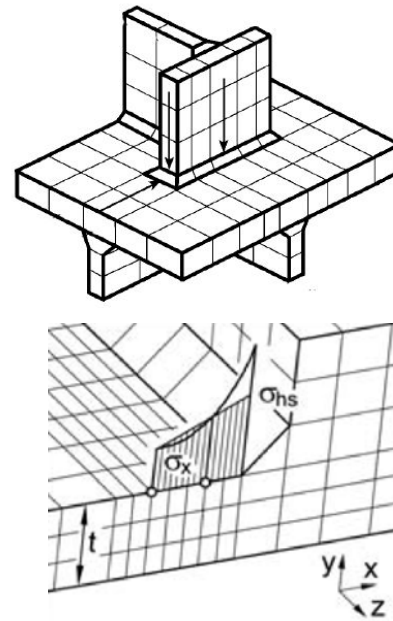


Рис. 5. Расчетная схема сварного соединения для определения напряжений в «горячей точке»

Поскольку непосредственное моделирование геометрии поверхности сварного соединения представляет значительные сложности в связи с ее непрогнозируемым изменением вдоль шва, в работе [7] введено понятие эффективного концентратора напряжений. В результате геометрия всех опасных зон сварного соединения описывается выкружкой с радиусом 1 мм (рис. 6).

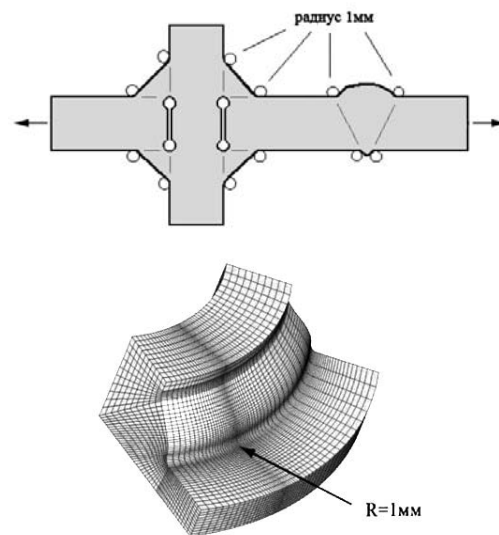


Рис. 6. Эффективный концентратор напряжений в расчетной схеме сварного соединения

Для оценки долговечности сварных узлов из конструкционных сталей в рекомендациях МИС предложена расчетная кривая усталости (предельный размах напряжений в эффектив-

ном концентраторе равен 225 МПа при 2×10^6 циклов), которая соответствует 5 %-ой вероятности зарождения усталостной трещины.

Оба приведенных метода расчета на усталость по локальному распределению напряжений в сварном соединении, могут быть использованы для узлов ОП, так как они позволяют учесть дополнительные напряжения.

Для определения НДС узлов в пространственной постановке задачи теории упругости необходимо использовать трехмерные элементы. Описание всей конструкции трехмерными элементами приведет к чрезмерно большим размерностям матрицы жесткости системы и длительности вычислений. Поэтому эффективно использовать расчетную модель, где вся конструкция аппроксимируется двумерными конечными элементами, а исследуемый фрагмент – трехмерными. При этом объединение блоков с разными типами элементов осуществляется по принципу абсолютно жестких тел с соответствующими кинематическими связями по их перемещениям.

Ниже представлено сопоставление долговечности на стадии зарождения трещин усталости, полученной по результатам натурных усталостных испытаний фрагмента ОП и прогнозируемой на основании рассмотренных выше методов номинальных и локальных напряжений. Последние устанавливались численно в соответствии с предлагаемым принципом сопоставления конечно-элементной модели ОП.

В работах [8,9] представлены результаты усталостных испытаний крупномасштабных сварных образцов, воспроизводящих узел пересечения продольного ребра жесткости и поперечной балки. Образец (рис. 7) представляет собой двутавровую балку высотой 530 мм и длиной 1138 мм. В стенке балки имеются вырезы круговой формы для пропуска плоского полосового ребра толщиной 18 мм. Образцы испытывались на трехточечный изгиб при отнулевом ($R_\sigma = 0$) цикле нагружения.

Для прогнозирования долговечности было выбрано два характерных места в образце, в которых зарождались трещины усталости (рис. 8).

Согласно расчету по методу номинальных напряжений была подобрана соответствующая категория детали. Она отвечает сварному соединению непрерывного продольного ребра и поперечной балки с предельным размахом номинальных напряжений $\sigma_{\text{ном}} = 56$ МПа при 2×10^6 циклов.

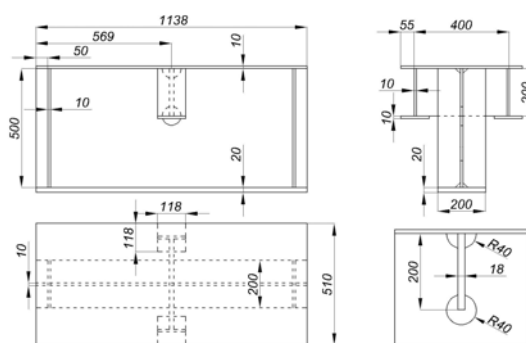


Рис. 7. Вид испытуемого образца сварного узла ортотропной плиты

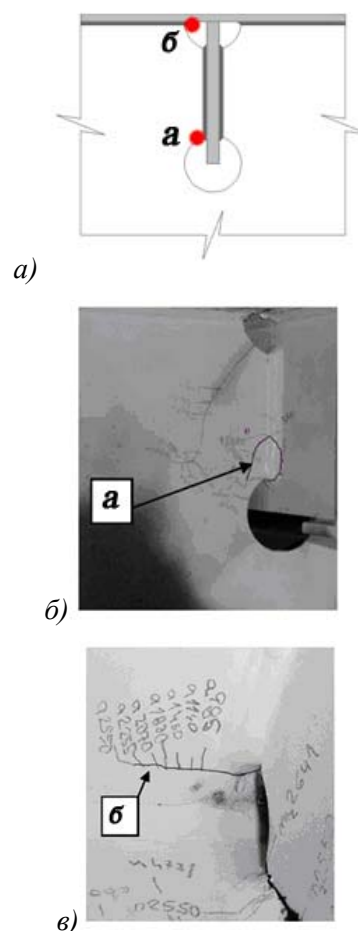


Рис. 8. Места в сварном образце для которых осуществлялось прогнозирование долговечности: а) – узел пересечения ребра жесткости со стенкой; б) – трещина усталости в зоне приварки стенки к ребру жесткости; в) – трещина усталости в зоне приварки стенки к листу настила

Для определения напряжений в «горячей точке» использовались рекомендации МИС, там же была подобрана соответствующая кривая усталости с предельным размахом напряжений в «горячей точке» $\sigma_{hs} = 90$ МПа при 2×10^6 циклов, отвечающая крестообразному

сварному соединению. На рис. 9, а представлена расчетная схема образца. На рис. 9, б показано выбор расчетных точек для поверхностной экстраполяции главных напряжений в «горячую точку».

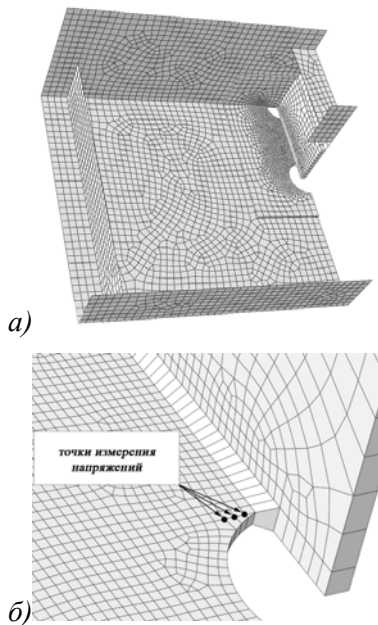


Рис. 9. Расчетная схема сварного образца для определения усталостной долговечности по методу напряжений в «горячей точке»

Результаты расчета приведены в табл. 1. Там же для сопоставления приведены результаты натурных испытаний по двум образцам.

Таблица 1

Сопоставление долговечности на стадии зарождения трещин усталости, полученной по результатам натурных усталостных испытаний образцов и прогнозируемой на основании метода номинальных напряжений и напряжений в «горячей точке»

Точка	Расчетный уровень напряжений, МПа		Долговечность, циклы		
	в сечении σ_{nom}	в «горячей точке» σ_{hs}	Метод номинальных напряжений EN 1993-1-9:2005	Метод напряжений в «горячей точке» (МИС)	Эксперимент
а	48	196	$3,17 \times 10^6$	$1,82 \times 10^5$	$3,04 \times 10^5$
б	50	200	$2,81 \times 10^6$	$1,78 \times 10^5$	$9,85 \times 10^5$

В работе [10] приведены результаты усталостных испытаний крупномасштабных образцов сварных ОП. Каждый образец состоит из листа

настила толщиной 16 мм, длиной 10 м и шириной 3 м, подкрепленного четырьмя продольными ребрами жесткости и тремя поперечными балками. Схема образца показана на рис. 10.

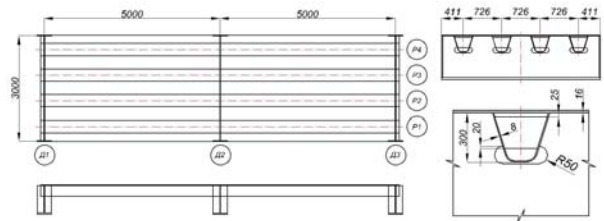


Рис. 10. Образец ортотропной плиты

Продольные ребра замкнутые, выгнутые в форме трапеции из листа толщиной 8 мм. Поперечные ребра имеют толщину 16 мм. Внутри продольных ребер жесткости, в местах пересечения с поперечными балками, установлены диафрагмы толщиной 8 мм.

Образцы испытывали при переменном нагружении ($R_\sigma = 0$), которое имитировало условия движения грузового транспорта. Схема нагружения первого образца представлена на рис. 11.

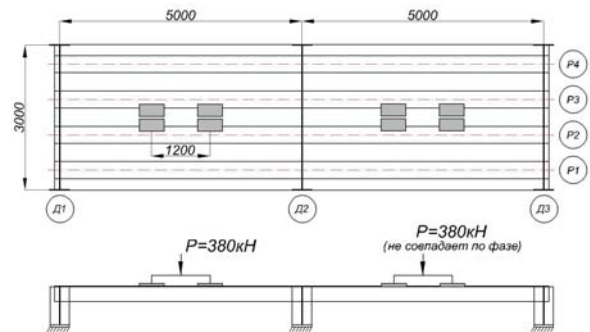


Рис. 11. Схема нагружения образца ортотропной плиты

Он имел жесткое защемление в основании поперечных балок. Усилия прикладывались в виде тандема к срединам пролетов и имели несовпадение по фазе.

В процессе испытания первого образца в районе $4 \times 10^5 \dots 6 \times 10^5$ циклов нагружения в узлах пересечения ребер появились усталостные трещины. Они зародились в стенках продольных ребер (P_2, P_3) по линии сплавления сварных швов в нижних частях диафрагм (рис. 12). Также трещины были обнаружены в стенках продольных ребер жесткости в области вырезов в поперечных балках. Испытания первого образца были прекращены при 1×10^6 циклов нагружения и к этому моменту трещины имели длину в диапазоне 25...106 мм. Численный расчет, проведенный перед испытаниями, показал

что, средний уровень напряжений в местах зарождения трещин был намного ниже предела текучести материала.

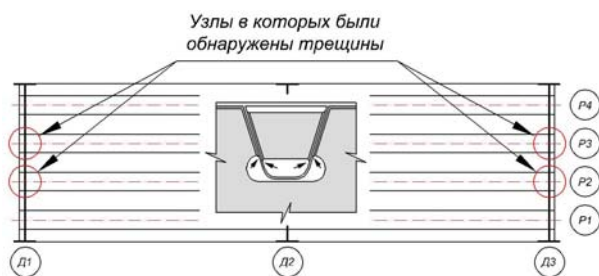


Рис. 12. Узлы, в которых обнаружены трещины

На рис. 13 представлен фрагмент расчетной схемы исследуемого узла.

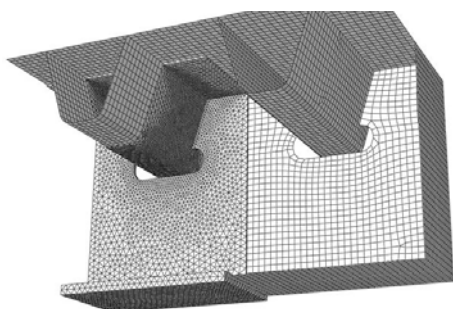


Рис. 13. Фрагмент расчетной схемы образца ортотропной плиты

С экспериментальными данными сопоставлялись прогиб листа настила в середине пролета и нормальные напряжения в продольном ребре. Расхождение не превышало 8 %.

На рис. 14 показана усталостная трещина в стенке продольного ребра жесткости по линии сплавления сварного шва под диафрагмой.



Рис. 14. Трещина усталости в узле пересечения ребер

Уровень приведенных напряжений в эффективных концентраторах составил 341 МПа и 368 МПа. При этом прогнозируемая циклическая долговечность на стадии зарождения трещин усталости составляет $4,57 \times 10^5$ и $5,78 \times 10^5$, а экспериментальные значения – $4 \times 10^5 \dots 6 \times 10^5$.

Как видно, результаты численного расчета с применением методов основанных на локальных напряжениях достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Выводы

1. Оценка сопротивления усталости сварных узлов пространственных конструкций пролетных строений мостов по номинальным напряжениям в расчетных сечениях не всегда позволяет учесть особенности их напряженно-деформированного состояния (НДС) при эксплуатации, что может приводить к преждевременному зарождению трещин усталости. Наиболее неблагоприятными в этом отношении являются узлы, подверженные одновременно осевому нагружению и пространственному изгибу.

2. Для расчета НДС ортотропной плиты (ОП) предложена конечно-элементная модель в соответствии с характером ее деформирования. Она составляется в основном из двумерных конечных элементов, а в зонах со сложным нагружением – из трехмерных. Объединение блоков с разными типами элементов осуществляется по принципу абсолютно жестких тел с соответствующими кинематическими связями по их перемещениям.

3. Совпадение прогнозируемой долговечности с установленной экспериментально подтвердило перспективность предлагаемого подхода. Расчет сопротивления усталости проводился по локальным напряжениям в зонах концентраторов на участках пересечения продольных ребер жесткости со стенкой поперечных балок ОП пролетного строения и базовой кривой сопротивления усталости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности [Текст] / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев; под ред. Б. Е. Патона – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
2. Лучко, Й. Й. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності [Текст] / Й. Й. Лучко, Г. Т Сулим, В. І. Кир'ян; за ред. Й. Й. Лучка. – Львів: Каменяр, 2004. – Т. 6. – 883 с.
3. Корнеев, М. М. Стальные мосты [Текст]: теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов / М. М. Корнеев. – К: Изд-во «Академпред», 2010. – Т. 1. – 532 с.
4. Sugioka, K. Life cycle evaluation of fatigue mitigation for orthotropic steel bridge decks. PhD

- thesis. University of Canterbury. New Zealand [Текст] / K. Sugioka. – 2009. – 456 p.
5. Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. European Communities [Текст], 2008.
 6. prEN 1993-2: 2004 Eurocode 3: Design of steel structures [Текст]. – Part 2: Steel Bridges.
 7. Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. International Institute of Welding [Текст], doc. XIII-1965r14-03/XV-1127r14-03. NY, 2009.
 8. Akhlaghi, F. Z., Fatigue testing and analysis of an orthotropic bridge welded detail using structural hot spot stress method. Proc. of the conference Fatigue Design [Текст] / F. Z. Akhlaghi, M. Al-Emrani, L. Frýba, S. Urushadze. – CETIM, Senlis, France, 2009.
 9. Akhlaghi, F. Z. Fatigue life assessment of welded bridge details using structural hot spot stress method [Текст] / F. Z. Akhlaghi // Master's Thesis. Chalmers University of Technology. – Sweden 2009. –122 p.
 10. Hyoung-Bo, Sim Effects of Fabrication Procedures and Weld Melt-Through on Fatigue Resistance of Orthotropic Steel Deck Welds [Текст] / Sim Hyoung-Bo, Chia-Ming Uang // Department of Structural Engineering University of California. – San Diego La Jolla. 2008. – 189 p..
 11. Fricke, W. Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSOs and Ships Based on Round-Robin FE Analyses. Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference [Текст]. – 2001. – P. 89-96.
 12. Jae-Myung, Lee et al. Comparison of hot spot stress evaluation methods for welded structures. Inter J Nav Archit Oc Engng (2010) [Текст] / Lee Jae-Myung et al. – P. 200-210.
 13. Хоббахер, А. Ф. Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям в зоне концентратора [Текст] / А. Ф. Хоббахер // Автомат. Сварка. – 2003. – № 10-11 – С. 122-126.

Поступила в редколлегию 14.06.2011.

Принята к печати 20.06.2011.