

Несущая способность кольцевых фланцевых соединений электросварных труб разного диаметра

А.Е. Кубасевич, А.В. Ковалевский

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет, Санкт-Петербург*

Аннотация: Для разработки методики оценки прочности кольцевых фланцев проведены исследования несущей способности монтажных соединений электросварных труб разного диаметра. В расчетах использовался компонентный метод конечных элементов (КМКЭ), реализованный в программном комплексе IDEA StatiCa Connection. Для верификации полученных результатов были выполнены численные эксперименты в программном комплексе ANSYS. Анализ результатов показал, что границы применимости КМКЭ при расчетах таких узлов следует ограничить отношением диаметров к толщине стенок труб D_1/t_1 до 40. Для практического применения предложены формулы проверки прочности кольцевых фланцев, учитывающие ослабление пластин отверстиями под болты.

Ключевые слова: несущая способность, кольцевые фланцы, электросварные трубы, монтажные соединения, прочность, компонентный метод, численный эксперимент.

Введение

Круглые трубы представляют собой оптимальное сечение для каркасов вытяжных башен, дымовых труб и других высотных сооружений. Это обусловлено несколькими факторами: меньшая интенсивность ветровой нагрузки на профили данного сечения по сравнению с другими, их высокая устойчивость к коррозии и экономичность. Как правило, монтаж соединений таких труб осуществляется с использованием фланцев (монтажная сварка имеет множество недостатков, в том числе низкую усталостную долговечность).

В российской литературе рекомендации и формулы для расчета безреберных фланцевых узлов соединений круглых электросварных труб в контексте проектирования антенно-мачтовых сооружений представлены в работах [1-3]. Более структурированные методики расчета таких узлов имеются в зарубежной литературе, при действии статической нагрузки в [4-5], при нагрузке, приводящей к усталостным повреждениям, в [6]. Для соединений труб, в особенности значительного диаметра, наиболее

экономически эффективными являются кольцевые фланцы. Существующие методики расчета таких узлов, приведенные в работах [2-3], жестко ограничены параметрами соединений, не отражающими полный спектр применяемых труб, кроме того не учитывается возможная разница в диаметрах, обусловленная переменностью сечения по высоте сооружений.

В настоящей работе приводятся результаты исследований несущей способности кольцевых фланцевых соединений электросварных труб разного диаметра, предложена методика расчета соединительных фланцев на прочность, которая может быть использована при их проверках.

Методы

Решение поставленной задачи базировалось на применении компонентного метода конечных элементов (КМКЭ), реализованного в программном комплексе IDEASTaTiCa Connection, общая методика которого излагалась в работе [7]. Результаты исследований сравнивались с расчетами по методике, приведенной в работах [2-3], с данными, приведенными в Серии 3.400-8 (Выпуск 2), и с результатами численного эксперимента, реализованного методом конечных элементов с использованием инструментария ANSYS.

Результаты

Исследования проводились для нескольких типов фланцевых стыков из электросварных труб разного диаметра (см. рис. 1), параметры которых были приняты с учетом анализа наиболее применяемых сечений согласно Серии 3.400-8 (Выпуск 2). Всего для расчетов было принято четыре типа узлов с соотношениями диаметров поясов $D_1/D_2=0,802\dots0,906$, их параметры приведены в табл. 1. Исследования узлов проводились при различных толщинах фланцев $t_{\text{фл}}$ (от 25 до 45 мм), принимаемых одинаковыми по обе стороны от стыка. Материал элементов стальных конструкций – сталь класса С255 (диаграмма работы материала показана на рис. 2) Материал для

сварки – электроды Э42, для упрощения расчетов соединения принимались с полным проваром. Класс прочности болтов во всех соединениях 10.9, класс точности – В.

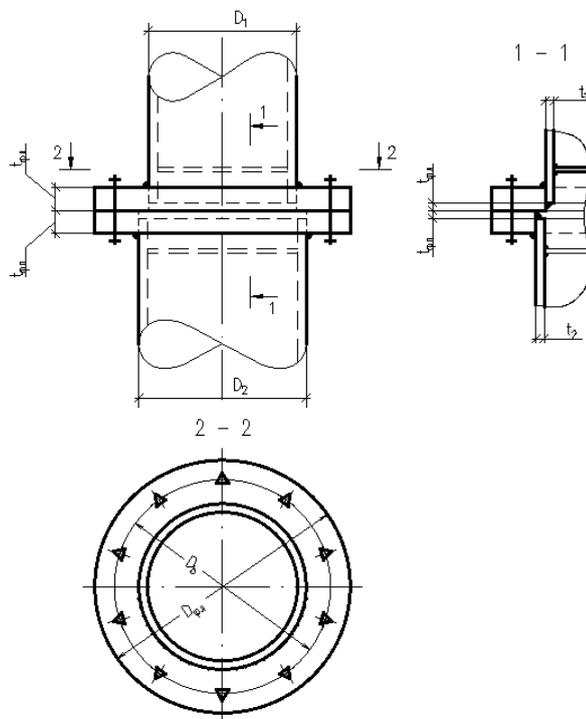


Рис. 1. Фланцевые соединения электросварных труб разного диаметра

Таблица № 1

Параметры фланцевых стыков электросварных труб

№ типа	D_1/t_1 , мм	D_2/t_2 , мм	D_1/D_2	D_b , мм	$D_{фл}$, мм	n_b	d_b , мм
1	219/7	273/8	0,802	370	460	8	30
2	273/8	325/9	0,840	450	570	10	36
3	426/5	480/5	0,888	570	660	10	30
4	480/5	530/7	0,906	650	770	12	36

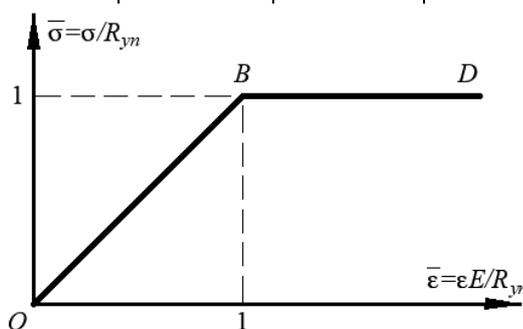


Рис. 2. Обобщенная диаграмма работы стали

Несущая способность фланцевых узлов на растяжение оценивалась в зависимости от толщины фланцев, предельные пластические деформации ограничивались $3\varepsilon_y$ ¹. Примеры характерных изополей эквивалентных напряжений при трубах с соотношениями D_1/D_2 0,802 и 0,906 показаны на рис. 3. Зависимости несущей способности узлов от толщин фланцев в интервале $t_{фл}=25\dots45$ мм показаны на графиках рис. 4. Для комплексной оценки они представлены в относительных параметрах $\bar{N}_p^{IS} = N^{IS} / N_0^{IS}$, где $N_0^{IS} = 664$ кН – максимальная несущая способность фланцевого соединения типа №1 (см. табл. 1) при $t_{фл}=25$ мм, более наглядно в табличном виде результаты приведены в табл. 2.

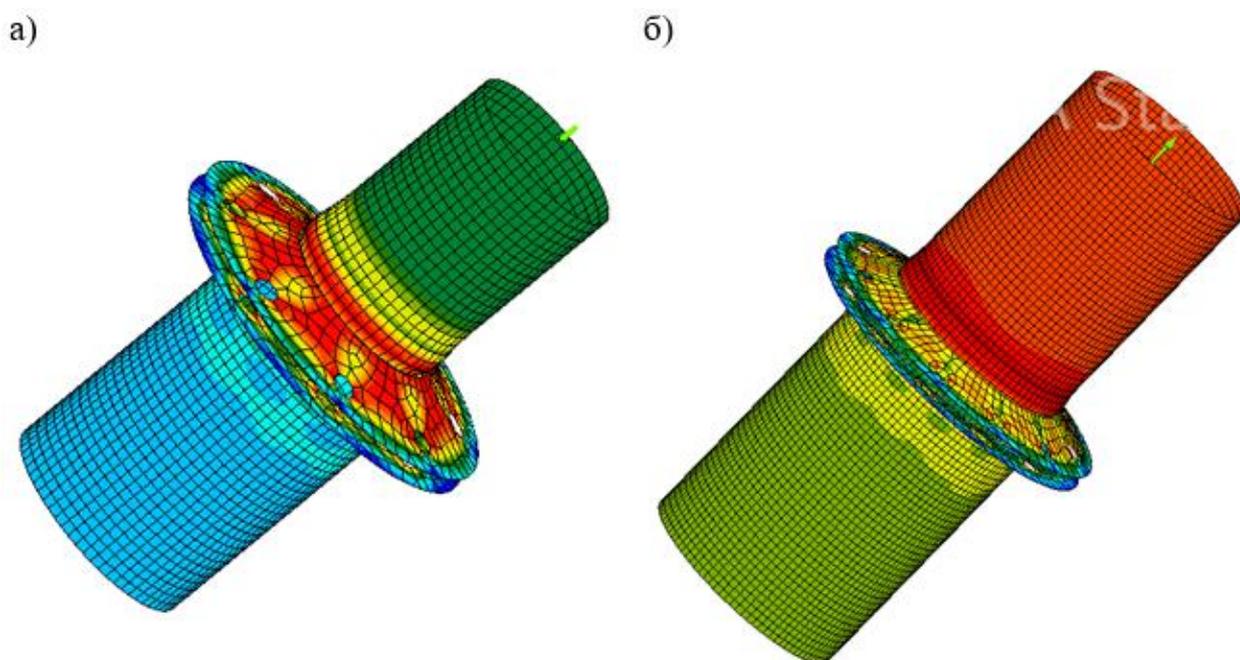


Рис. 3. Изополя эквивалентных напряжений фланцевых узлов из электросварных труб: а) тип №1; б) тип №2

¹ СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2017. 167 с.

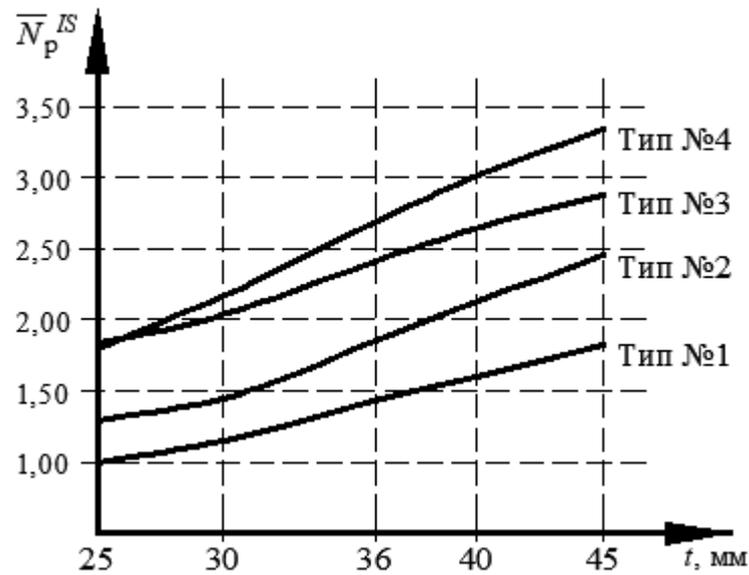


Рис. 4. Несущая способность узлов в зависимости от толщины фланцев

Таблица 2

Несущая способность фланцевых стыков электросварных труб разного

диаметра \bar{N}_p^{IS}

$t_{\text{фл}}$	№ типа узла по табл. 1			
	1	2	3	4
25	1,000	1,297	1,831	1,801
30	1,152	1,453	2,036	2,168
36	1,434	1,854	2,414	2,688
40	1,602	2,130	2,643	3,008
45	1,824	2,449	2,883	3,340

По результатам расчетов было выявлено, что во всех случаях наибольшие напряжения возникают во фланце по сторону стыка с меньшим диаметром трубы (см. рис. 3). Во всех случаях общий характер изменения несущей способности соединений на растяжение в зависимости от толщин фланцев – однородный.

Предельное продольное усилие узлов с кольцевыми фланцами при работе на растяжение согласно методикам расчета, приведенным в [2-3], определяется по формуле:

$$N^{RM} = k_1 k_2 t_{\text{фл}}^2, \quad (1)$$

где N^{RM} – расчетное усилие растяжения в поясе; $k_1 = R_{yn}/240$, R_{yn} – нормативный предел текучести стали, МПа; k_2 – коэффициент, принимаемый по вспомогательным таблицам в зависимости от отношений геометрических параметров: $D_{фл}/D_b$, D_b/D , D/t , $t_{фл}/t$. Приведенные табличные значения коэффициента k_2 подсчитаны в предположении, что в фланцах, расположенных по окружности с радиусом D , возникают напряжения, равные пределу текучести стали 240 Н/мм^2 . Следует отметить, что в данной методике не учитываются ослабления фланцев отверстиями под болты и возможная разница диаметров стыкуемых труб.

При расчетах по упомянутой методике имеются ограничения: отношение $D_{фл}/D$ находится в интервале от 1,2 до 2, $D_{фл}/D_b$ – от 1,2 до 1,4, $t_{фл}/t$ – от 3 до 7 и D/t – от 5 до 15. Взаимоотношения диаметров $D_{фл}$, D_b и D в большинстве случаев охватывают спектр проектируемых узлов, однако, многие встречающиеся в практике взаимоотношения диаметров к собственным толщинам труб и фланцев часто выходят за указанные диапазоны, поэтому использовать справочные таблицы не представляется возможным. В работе [8] имеются формулы, в целом подтверждающие табличные значения, которые можно использовать для сравнения с результатами, полученными при помощи КМКЭ. В упрощенном виде формулу для определения предельных усилий можно представить в следующем виде (ввиду громоздкости подробное содержание формул в настоящей работе опущено):

$$N^{RM} = \frac{t_{фл}^2 R_y \gamma_c}{6 \cdot f(D_{фл}/D_b, D_b/D, D/t, t_{фл}/t)}, \quad (2)$$

где $f(D_{фл}/D_b, D_b/D, D/t, t_{фл}/t)$ – вычисляемый коэффициент, зависящий от соотношений геометрических параметров соединения.

Сравнение предельной несущей способности фланцевых узлов электросварных труб на растяжение, полученных по КМКЭ N^{IS} и

вычисленных по формуле (2) N^{RM} , приведены в табл. 3, при этом в расчетах принималось, что $D=D_{min}$. Дополнительно приведены данные по несущей способности соединений при работе на растяжение из Серии 3.400-8 (Выпуск 2) $N^{Сер}$.

Таблица 3

Предельная несущая способность фланцевых стыков электросварных труб разного диаметра N^{IS} и N^{RM}

№ типа	$t_{фл}$	N^{IS}	N^{RM}	$N^{Сер}$
1	25	512	245	
	30	590	297	
	36	734	378	456
	40	820	442	
	45	934	534	
2	25	664	305	
	30	744	358	
	36	949	437	
	40	1091	502	929
	45	1254	596	
3	25	938	307	
	30	1043	371	346
	36	1236	473	
	40	1353	554	
	45	1476	671	
4	25	922	311	
	30	1110	377	
	36	1376	481	
	40	1540	564	
	45	1710	684	867

Из табл. 3 видно, что при малых отношениях диаметров труб к их толщинам ($D_1/t_1 < 40$) результаты расчетов по КМКЭ демонстрируют хорошую сходимость с данными из Серии 3.400-8 (Выпуск 2) с поправками на запасы, заложенные разработчиками серии в 1980 году, отклонения составили 61% и 17% соответственно для узлов типов №1 и №2. Однако, при значительных соотношениях $D_1/t_1 > 75$ расхождения составляют два и более

раза. Расчеты по справочным методикам значительно расходятся с расчетами на базе КМКЭ, и в целом дают более консервативные результаты по сравнению с данными из серии.

Для верификации полученных результатов был проведен численный эксперимент в программном комплексе ANSYS для узлов, в которых имеются наибольшие расхождения. Общая методика расчета узлов стальных конструкций в твердотельной постановке приводится в работах [7,9,10]. Проводился расчет узлов типов №1, №3 и №4 (при толщинах фланцев соответственно 36, 30 и 45 мм, согласно серии) с учетом физической нелинейности стали и материала шва. Контактные пары фланцев и труб моделировалась конечными элементами типов TARGE174 и CONTAC174, тип контакта был принят как Frictionless. Деформированные схемы узлов показаны на рис. 5 (для упрощения модели болтов скрыты).

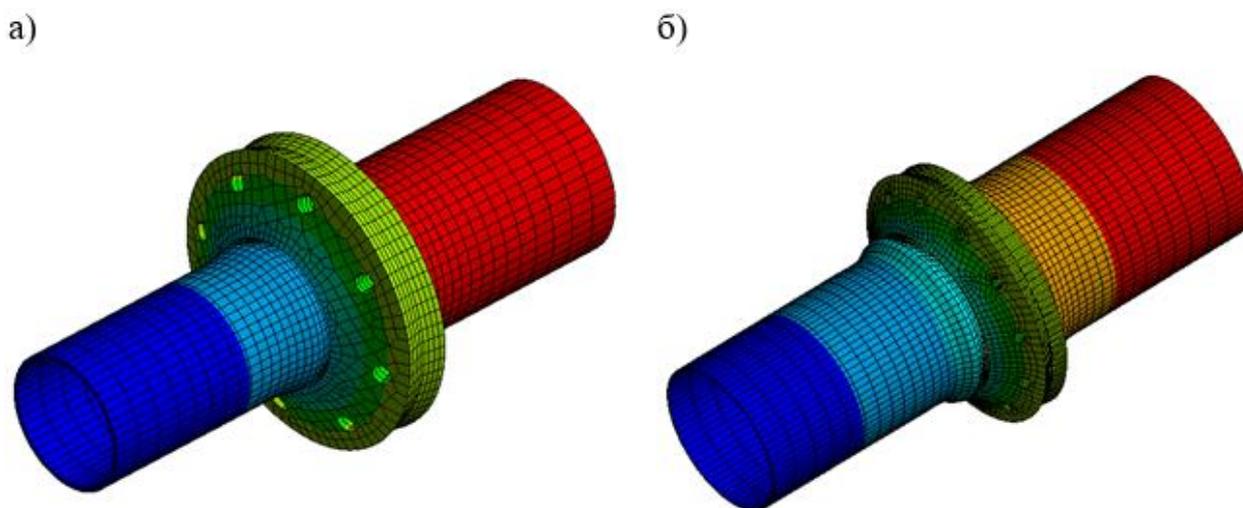


Рис. 5. Деформированные схемы узлов в ANSYS: а) тип №1, $t_{\text{фл}}=36$ мм;
б) тип №4, $t_{\text{фл}}=45$ мм

Несущая способность соединения при действии растягивающих усилий, определенная по результатам расчетов в ANSYS, составила $N_1=517$ кН, $N_2=425$ кН и $N_3=1110$ кН (с использованием КМКЭ $N_1^{IS}=734$ кН, $N_2^{IS}=1043$ кН и $N_3^{IS}=1710$ кН). Согласно данным из Серии 3.400-8 (Выпуск 2), значения предельных усилий составляют: $N_1=456$ кН, $N_2=346$ кН и $N_3=867$ кН,

расхождения с данными из серии не превышают 28%, что в целом соответствует запасам прочности, закладываемым коэффициентами надежности при расчетах по предельным состояниям. Следует подчеркнуть, что для полного подтверждения результатов требуются проведение натурных испытаний подобных узлов. Расхождения с КМКЭ при $D_1/t_1 > 75$ составляют до 60%, при $D_1/t_1 < 40$ – до 30 %, во всех случаях в сторону завышения предельной несущей способности.

Обсуждение

На основе сравнительного анализа результатов расчетов КМКЭ и численного эксперимента можно сделать вывод, что при соотношениях $D_1/t_1 > 75$ КМКЭ не применим для разработки инженерной методики оценки прочности фланцев. Это связано с тем, что при малых толщинах труб больших диаметров часть ее деформируется таким образом, что на стыке с фланцами она принимает форму усеченного конуса (что видно на деформированных схемах узлов на рис. 5). Жесткость упругой заделки фланца в стенку трубы значительно снижается, что не может быть учтено в расчетном комплексе IDEAS StatiCa Connection, поскольку в нем модели труб и фланцев представлены плоскими пластинами, жестко закрепленными в узлах приварки (см. рис. 3).

Границы применимости КМКЭ следует ограничить отношением D_1/t_1 до 40. В практическом применении для проверки прочности фланца по одну сторону стыка от действия растягивающего усилия предлагается использовать формулы, приведенные в британских нормах², в которых сопротивление кольцевого фланца на изгиб определяется с учетом ослаблений отверстиями. Упрощенные и приведенные по форме к российским нормам проектирования формулы проверки прочности

² BS EN 1591-1:2001 Flanges and their joints — Design rules for gasketed circular flange connections – Part 1: Calculation method / European committee for standartization. Brussels: CEN, 2001. 52 p.

кольцевого фланца при соединении труб разного диаметра будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{M}{W_{\text{фл}} R_y \gamma_c} \leq 1; \quad (3)$$

$$M_{\text{фл}} = \frac{N_p \cdot D_{\text{min}}}{2}; \quad (4)$$

$$W_{\text{фл}} = 2 \left[\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_b}{2} - d_0 \sqrt{\frac{n_b d_0}{\pi D_b}} \right) t_{\text{фл}}^2 \right], \quad (5)$$

где N_p – усилие растяжения в поясе; $M_{\text{фл}}$ – расчетный момент во фланце; $W_{\text{фл}}$ – приведенное сопротивление фланца на изгиб, определяемое в зависимости от диаметра болтовой окружности, количества и диаметров отверстий под болты и толщины фланцев; γ_c – коэффициент условий работы, который следует принимать в зависимости от толщины фланцев: 1,1 при $t < 30$ мм; 1,0 при $30 \leq t < 40$ мм и 0,9 при $t \geq 40$ мм.

Сравнение несущей способности фланцевых соединений электросварных труб разного диаметра, определенной с помощью КМКЭ и вычисленной по формуле (3), показало хорошую сходимость, расхождение в среднем составило 32,4%. Такой запас позволяет учесть влияние остаточных сварочных напряжений, геометрических несовершенств труб и пр. Как видно из формул (4) и (5) толщина фланца во многом зависит от соотношения диаметра расстояния по осям болтов к диаметру трубы. Снижение расхода стали может быть достигнуто выбором оптимальных размеров D_b и $D_{\text{фл}}$, для чего, например, можно использовать больше болтов относительно малого диаметра. Также следует отметить, что предлагаемая методика подлежит уточнению при получении данных о влиянии соотношений прочности фланцев и труб и несовершенств на работу узла и результатов натуральных испытаний.

Для разработки инженерной методики расчета при отношении $D_1/t_1 > 75$ следует проводить дополнительные численные и натурные эксперименты. Приблизительно для таких соединений допускается применять методики, дающие консервативные результаты, такие, как те, которые представлены в [10].

Выводы

1. Из анализа российской и зарубежной литературы по расчету кольцевых фланцевых стыков электросварных труб следует, что на сегодняшний день отсутствует алгоритм для расчета соединений труб разного диаметра. Предлагаемая методика, учитывающая ослабления фланцев отверстиями под болты, позволит оценить прочность кольцевого фланца узла.

2. При соотношениях $D_1/t_1 > 75$ КМКЭ не применим для корректной оценки прочности соединения. Границы применимости следует ограничить отношением D_1/t_1 до 40.

В дальнейшем планируется провести исследование работы кольцевого фланцевого соединения электросварных труб разного диаметра на сжатие, а также особенностей работы угловых сварных швов. Результаты, изложенные в данной статье, могут быть использованы при разработке соответствующих нормативных методик.

Литература

1. Морозов Е.П., Шофлер Л.В. Особенности проектирования антенно-мачтовых сооружений длинноволновых радиостанций // Материалы по металлическим конструкциям: Сб. Вып. 15. М., Стройиздат, 1970. С. 93-106.

2. Соколов А.Г. Металлические конструкции антенных устройств. М.: Стройиздат, 1971. 239 с.

3. Соколов А.Г. Опоры линий передач. М.: Госстройиздат, 1961. 172 с.

4. Igarashi, S., Wakiyama, K., Inoue, K., Matsumoto, T., and Murase, Y. Limit design of high strength bolted tube flange joint, Part 1 and 2. Journal of Structural

and Construction Engineering, Transactions of AIJ. Department of Architecture Reports, Osaka University, Japan, 1985. Pp. 52-66

5. Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J.A., Vegte, G.J. van der, Zhao, X.-L. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. CIDECT, Geneva, Switzerland, 2008. 142 p.

6. X.-L. Zhao, S. Herion, J. A. Packer, R. S. Puhtli, G. Sedlacek, J. Wardenier, K. Weynand, A. M. van Wingerde, N. F. Yeomans Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading. TUV-Verlag, 2000. 121 p.

7. Мамедов Ш.М., Хегай Т.С., Кубасевич А.Е., Ковалевский А.В. Несущая способность усиленных узлов стальных ферм из гнутосварных профилей на продавливание // Инженерный вестник Дона, 2023, № 6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8486.

8. Соколов А.Г. Действительная работа фланцевых соединений // Материалы по стальным конструкциям: Сб. №2, 1958. С. 151-155.

9. Кубасевич А.Е. Работа подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров, 2021, № 3. С. 64-70.

10. Трастян Н.А., Линьков Н.В. Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646

References

1. Morozov E.P., Shofler L.V. Materialy po metallicheskim konstruktsiyam: Sb. Rel. 15. Moskva, Stroyizdat, 1970. Pp. 93-106.

2. Sokolov A.G. Metallicheskie konstruktsii antenykh ustroystv [Metal structures of antenna devices]. Moskva: Stroyizdat, 1971. 239 p.

3. Sokolov A.G. Opory liniy peredach [Transmission line supports]. Moskva: Gosstroyizdat, 1961. 172 p.



4. Igarashi, S., Wakiyama, K., Inoue, K., Matsumoto, T., and Murase, Y. Limit design of high strength bolted tube flange joint, Part 1 and 2. Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of AIJ. Department of Architecture Reports, Osaka University, Japan, 1985. Pp. 52-66

5. Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J.A., Vegte, G.J. van der, Zhao, X.-L. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. CIDECT, Geneva, Switzerland, 2008. 142 p.

6. X.-L. Zhao, S. Herion, J. A. Packer, R. S. Puhtli, G. Sedlacek, J. Wardenier, K. Weynand, A. M. van Wingerde, N. F. Yeomans Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading. TUV-Verlag, 2000. 121 p.

7. Mamedov Sh.M., Khegay T.C., Kubasevich A.E., Kovalevskiy A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8486.

8. Sokolov A. G. Materialy po stal'nyh konstruktsiyam: Col. №2, 1958. Pp. 151-155.

9. Kubasevich A.E. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2021, № 3. Pp. 64-70.

10. Trastyan N.A., Lin'kov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646

Дата поступления: 27.04.2024

Дата публикации: 25.06.2024