

УДК 622.276.04

ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Староконь И.В.

*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,
Москва, e-mail: starokon79@mail.ru*

В статье исследуется усталостная долговечность сварных соединений и основных конструктивных элементов опорных блоков морских стационарных платформ. Метод расчета долговечности базируется на модифицированной теории С.В. Когаева линейного суммирования повреждений. На основе исследований Р.Г. Губайдулина проведена оценка ресурса сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ. С использованием собственных экспериментальных данных автором был произведен расчет ресурса отремонтированных сварных соединений. Установлено, что ресурс таких соединений составляет приблизительно 30–40% от исходного. Так же на основе собственных выведенных формул автором проанализировано влияние коррозионного и температурного воздействия на усталостную долговечность основных конструктивных элементов опорного блока морской стационарной платформы. В результате расчетов установлено, что совместное действие коррозионного и температурного воздействий снижает усталостную долговечность в некоторых случаях с 21 года до 13 лет.

Ключевые слова: усталостная долговечность, морские стационарные платформы, переменные, циклы, напряжения, колонны, сварные соединения, тавровые, опорный блок, волновая нагрузка, коэффициенты концентрации напряжений

ESTIMATION OF FATIGUE LIFE OF WELDED JOINTS AND BASIC ELEMENTS OF THE SUPPORT BLOCKS OF FIXED OFFSHORE PLATFORMS

Starokon I.V.

Russian state University of oil and gas named after I.M. Gubkina, Moscow, e-mail: starokon79@mail.ru

The article investigates the fatigue life of welded joints and basic structural elements of the support blocks of fixed offshore platforms. Method of calculation of durability is based on a modified theory S.V. Kogaeva of method of linear summation of damage. Based on the research of R.G. Gubaidulina evaluation of resource welded joints basic blocks of fixed offshore platforms. Using their own experimental data, the author has produced a resource calculation of repaired welds. It is established that the resource of such compounds is approximately 30–40% of the original. On the basis of its deduced formulas the author has analyzed the impact of corrosion and temperature effects on fatigue life of the main structural elements of the support block fixed offshore platforms. The calculations established that the combined effect of corrosion and temperature effects reduces fatigue life in some cases from 21 years to 13 years. Also, the author offers a formula that allows to average the values of the coefficients of stress concentration from corrosion, which will allow to correct the values of the fatigue life of the main structural elements of the support block fixed offshore platforms.

Keywords: marine stationary platform, variables, loops, stress, columns, welds, t-sections, base plate, wave load, the coefficients of stress concentration, fatigue limit

Для оценки усталостной долговечности как сварных соединений, так и основных конструктивных элементов широко применяется теория С.В. Когаева, которая является модернизированной теорией Палгрейма – Мейера, хорошо апробированной на практике. Для оценки этой длительности необходимо знать значения амплитуд переменных напряжений, условий его нагружения и блоки амплитуд напряжений в течение срока эксплуатации. Кроме этого, необходимо знать механические свойства металла, и для сварных соединений значения остаточных напряжений в металле с учетом воздействия коррозионной среды, влияющие, как это доказано в диссертационной работе И.В. Староконь, на значения

пределов выносливости. Опишем методику и рассмотрим пример оценки ресурса сварного соединения опорного блока морской стационарной платформы, находящегося в подводной зоне, по данным, приведенным в работе [2], и сравним полученные результаты по скорректированной гипотезе, учитывающей влияние коэффициентов концентрации напряжений для сварных соединений. Также по полученной в диссертационной работе И.В. Староконь кривой усталости проведем оценку усталостной долговечности восстановленного сварного соединения. Приведем исходные данные, необходимые для расчета: высота волны с 1% обеспеченностью составляет 11,2 м, длина волны 149 м, период волны 10,6 с,

глубина моря 30 м, величина статической составляющей номинальных растягивающих напряжений в сварном соединении составляет 80 МПа. Для оценки усталостной долговечности сварного соединения необходимо знать его напряженное состояние, которое позволит разделить напряжения, вызванные различными по величине нагрузками, на блоки амплитуд переменных напряжений за один год эксплуатации. Блок нагружения состоит из нескольких ступеней нагрузок, каждая из них вызывает переменные напряжения, которые можно охарактеризовать амплитудой переменного напряжения σ_{ai} , числом повторений этой амплитуды в ступени ν_{ai} и частотой приложения нагрузки ν . Долговечность рассчитываемого узла, выраженная количеством блоков нагружения λ , определится по формуле

$$\lambda = \frac{a_p}{\sum_{i=1}^g \frac{\nu_{i\sigma} \sigma_{ai}^{m_1}}{\sigma_{Rki}^{m_1} N_{Gi}} + \sum_{i=1}^k \frac{\nu_{i\sigma} \sigma_{ai}^{m_2}}{\sigma_{Rki}^{m_2} N_{Gi}}} \quad (1)$$

$(\sigma_{ai} > \sigma_{Rk}) (\sigma_{ai} < \sigma_{Rk});$

a_p – критическая степень поврежденности материала, соответствующая моменту разрушения, а остальные значения приведены в работе [2, 3]. Проведем соответствующие расчеты, основываясь на исходных данных, приведенных в работе [2]. Общее количество циклов волновой нагрузки в год по результатам расчета ν_{σ} равно 30532411. Если a_p по результатам расчета менее 0,2, то в расчетах следует принимать равным 0,2 [3], так как меньшее значение не оправдывается

экспериментальными результатами. В соответствии с данными DNV-RP-C203 примем $m_1 = 3$ и $m_2 = 5$.

В результате расчета установлено, что долговечность сварного шва составляет **38,7 лет**.

Проведем сравнительный анализ расчета долговечности сварного соединения с учетом значений коэффициентов концентрации напряжений, рассчитанных в диссертационной работе И.В. Староконов и в работе [8]. Так как нашей задачей является создание блоков нагружений, а значения коэффициентов концентрации напряжений (ККН) возрастают с течением времени эксплуатации, то необходимо привести эти величины к некоторому среднему значению. По мнению автора, это можно сделать по формуле

$$K = \frac{K_{\min} + 4K_{\text{cp}} + K_{\max}}{6}, \quad (2)$$

где K – коэффициент концентрации напряжений, используемый при описании блока нагрузки; K_{\min} , K_{\max} , K_{cp} – минимальные, максимальные и средние значения величин ККН, рассчитанные за рассматриваемый период эксплуатации. K_{cp} определяется как среднее арифметическое значение. Например, для соединений, представляющих собой соединение подводных частей колонн с горизонтальными элементами, при скорости коррозии 0,12 мм/год коэффициенты концентрации напряжений, используемые при расчете в блоке нагружения для некоторых соединений, равны 1,1–1,14.

Таблица 1

Характеристики блоков амплитуд переменных напряжений в сварном соединении опорного блока МСП

Высота волны, h	Амплитуда переменных напряжений, σ_a	Число случаев повторения амплитуды в блоке, $\nu_{i\sigma}$	t	σ_i/σ_{\max}
11,2	41	430	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$1,408 \cdot 10^{-5}$
9	30	2425	$7,94 \cdot 10^{-5}$	$5,811 \cdot 10^{-5}$
7	20	8447	$27,7 \cdot 10^{-5}$	$13,49 \cdot 10^{-5}$
5,5	16	22912	$75 \cdot 10^{-5}$	$29,28 \cdot 10^{-5}$
4,5	12	48386	$158,5 \cdot 10^{-5}$	$46,38 \cdot 10^{-5}$
3,5	10	514688	$168,57 \cdot 10^{-4}$	$41,11 \cdot 10^{-4}$
2,5	8	974097	$31,9 \cdot 10^{-3}$	$6,22 \cdot 10^{-3}$
1,5	7	2421847	$7,93 \cdot 10^{-2}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$
0,5	5	7539179	$24,69 \cdot 10^{-2}$	$3,011 \cdot 10^{-2}$
< 0,5	3	18849092	$62,23 \cdot 10^{-2}$	$5,0086 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Значения коэффициентов концентрации напряжений в зависимости от длительности эксплуатации

Соединяемые элементы	Продолжительность коррозионного воздействия, лет											
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	K_{cp}	K
530×14	1,02	1,05	1,07	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,27	1,14	1,14
530×18	1,02	1,03	1,05	1,07	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18	1,20	1,10	1,11

Таблица 3

Характеристики блоков амплитуд переменных напряжений в сварном соединении опорного блока МСП с учетом коррозионного воздействия

Высота волны, h	Амплитуда переменных напряжений, σ_a	Число случаев повторения амплитуды в блоке, $v_{i\sigma}$	t	σ_i/σ_{max}
11,2	45,1	430	$1,41 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
9	33	2425	$7,94 \cdot 10^{-5}$	$6,39 \cdot 10^{-5}$
7	1,12	8447	$27,7 \cdot 10^{-5}$	$14,845 \cdot 10^{-5}$
5,5	17,6	22912	$75 \cdot 10^{-5}$	$32,21 \cdot 10^{-5}$
4,5	13,2	48386	$158,5 \cdot 10^{-5}$	$51,021 \cdot 10^{-5}$
3,5	11	514688	$168,57 \cdot 10^{-4}$	$45,22 \cdot 10^{-4}$
2,5	8,8	974097	$31,9 \cdot 10^{-3}$	$68,47 \cdot 10^{-4}$
1,5	7,7	2421847	$7,93 \cdot 10^{-2}$	$14,89 \cdot 10^{-3}$
0,5	5,5	7539179	$24,69 \cdot 10^{-2}$	$33,12 \cdot 10^{-3}$
< 0,5	3	18849092	$62,23 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$

Проиллюстрируем влияние этих коэффициентов на величину усталостной долговечности сварных соединений. Как и в предыдущем случае, примем общее количество циклов волновой нагрузки в год v равным 11532411, а величину a_p равной 0,2, если по результатам расчета она будет менее 0,2. Остальные значения те же, что и в предыдущем случае.

При введении этой поправки скорректированный ресурс составит **28,74** лет.

Вторым практически важным моментом является оценка усталостной долговечности сварного соединения после ремонта. Используя полученную экспериментально в третьей главе кривую усталости, рассчитаем ресурс

восстановленного соединения. Ввиду отсутствия данных о показателях наклона правой ветви кривой усталости на участке после ее перелома в расчетах будем использовать только те значения напряжений, которые выше установленного ранее предела выносливости в 13 МПа. Отметим, что эти величины переменных амплитуд, значения которых меньше предела выносливости, незначительно влияют на общие показатели долговечности. Значение точки перелома кривой усталости по результатам выполненных автором экспериментов $N_G = 3 \cdot 10^6$ циклов. В результате расчета установлено, что значение $a_p = 0,36$, значение $v_{i\sigma} = 82600$. Получим следующие значения.

Таблица 4

Характеристики блоков амплитуд переменных напряжений в восстановленном сварном соединении опорного блока МСП

Высота волны, h	Амплитуда переменных напряжений, σ_a	Число случаев повторения амплитуды в блоке, $v_{i\sigma}$	t	σ_i/σ_{max}
11,2	45,1	430	$52,05 \cdot 10^{-4}$	$52,05 \cdot 10^{-4}$
9	33	2425	$29,35 \cdot 10^{-3}$	$21,48 \cdot 10^{-3}$
7	1,12	8447	$10,22 \cdot 10^{-2}$	$49,88 \cdot 10^{-3}$
5,5	17,6	22912	$27,7 \cdot 10^{-2}$	$10,82 \cdot 10^{-2}$
4,5	13,2	48386	$58,57 \cdot 10^{-2}$	$17,14 \cdot 10^{-2}$

Проведя все необходимые вычисления, получим, что при тех же условиях эксплуатации остаточный ресурс восстановленного сварного соединения составит **6,9** лет. Коэффициенты концентрации напряжений от коррозионного воздействия при такой незначительной длительности эксплуатации не оказывают существенного влияния, увеличивая амплитуды переменных напряжений приблизительно на 4%, поэтому их влиянием можно пренебречь. В соответствии с методикой Серенсена и Когаева [3] исследуем усталостную долговечность колонн, раскосов и горизонтальных элементов. Расчет долговечности будет производиться по базовой гипотезе, в которой учитываются переменные амплитуды, вызванные ветроволновым воздействием, и по скорректированной гипотезе, в которой учитываются температурные, вибрационные и коррозионные воздействия. Рассчитаем эквивалентные амплитуды напряжений для горизонтальных элементов опорного блока МСП, выполненных из стали 09Г2С. На основании данных, приведенных в диссертационной работе И.В. Староконь рассчитаем ресурс горизонтальных элементов опорного блока МСП, расположенного в зоне периодического смачивания, в которой действуют максимальные переменные напряжения. Как показали расчеты, при скорости ветра 10 м/с амплитуда переменного напряжения составляет менее 22,5 МПа, что в соответствии с требованиями [3] позволяет

ее не учитывать при расчетах, т.к. такая величина амплитуды не оказывает повреждающего воздействия. При скорости ветра 15 м/с возникает переменная амплитуда напряжений 23 МПа, при скорости ветра 20 м/с переменная амплитуда напряжений равна 36 МПа, при скорости ветра 25 м/с переменная амплитуда напряжений равна 47 МПа. Расчетами по указанной в [2, 3] методике было установлено, что долговечность горизонтального элемента составляет приблизительно 21,3 года. Основные этапы расчета приведены в табл. 5.

Следует отметить, что элементы опорного блока, находящиеся в надводной зоне, подвержены температурно-коррозионному воздействию. Коррозионное воздействие, изменяет механические и геометрические характеристики конструктивных элементов ОБ МСП, что изменяет площадь поперечного сечения, момент инерции и сопротивления, увеличивая значения действующих в сечении элементов напряжений. В результате расчета было установлено, что значение суммы относительных повреждений равно 0,2. Основные этапы расчета приведены в табл. 6. Введение усредненного за двадцатилетний срок эксплуатации коэффициента концентрации напряжений от коррозионного воздействия 1,25 снижает долговечность горизонтальных элементов, расположенных в зоне переменного смачивания, с 21 года до 13 лет.

Таблица 5

Расчет ресурса горизонтальных элементов опорного блока МСП

Скорость ветра	Значение амплитуды переменного напряжения σ_a , от ВВН	Количество повторений i -й амплитуды в блоке	Относительная наработка на i -м уровне напряжений	Произведение относительной наработки на i -м уровне на отношение i -й амплитуды к максимальной амплитуде в блоке
10 м/с	$\leq 22,5$ МПа	–	–	–
15 м/с	23	544186	0,319902833	0,156548195
20 м/с	36	67583	0,039728943	0,03043068
25 м/с	47	14545	0,008550627	0,008550627

Таблица 6

Расчет ресурса горизонтальных элементов опорного блока МСП с учетом коррозионного воздействия

Скорость ветра	Значение амплитуды переменного напряжения σ_a , от ВВН	Количество повторений i -й амплитуды в блоке	Относительная наработка на i -м уровне напряжений	Произведение относительной наработки на i -м уровне на отношение i -й амплитуды к максимальной амплитуде в блоке
10 м/с	$\leq 22,5$ МПа	–	–	–
15 м/с	28,75	544186	0,319902833	0,156551324
20 м/с	45	67583	0,039728943	0,030431288
25 м/с	58,75	14545	0,008550627	0,008550798

Таблица 7

Расчет ресурса горизонтальных элементов опорного блока МСП с учетом температурного воздействия

Скорость ветра	Значение амплитуды переменного напряжения σ_a от ВВН	Количество повторений i -й амплитуды в блоке	Относительная наработка на i -м уровне напряжений	Произведение относительной наработки на i -м уровне на отношение i -й амплитуды к максимальной амплитуде в блоке
10 м/с	$\leq 22,5$ МПа	–	–	–
15 м/с	23	544186	0,319909227	0,105113032
20 м/с	36	67583	0,039729737	0,020432436
25 м/с	47	14545	0,008550798	0,00574125
Температурные напряжения	70	331	0,000194584	0,000194584

Оценивая температурное воздействие, можно отметить, что несмотря на то, что температурное воздействие имеет малую частоту циклов, тем не менее она создает значительные по величине переменные напряжения. В работах [4, 5, 6, 7] описана методика оценки температурного состояния конструктивных элементов опорного блока. Повреждающее действие переменных амплитуд напряжений должно быть не менее 22,5 МПа. Совершенно очевидно, что размах температурного напряжения для оказания повреждающего воздействия должен быть равен 55 МПа, что при известных значениях модуля Юнга (приблизительно 205 000 МПа для стали 09Г2С в зависимости от температуры окружающей среды) и коэффициента линейного теплового расширения ($11,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ для стали 09Г2С) достигается при суточном перепаде температур конструктивного элемента приблизительно в 24°C . Это условие выполняется, например, при соответствующем суточном колебании температур, либо при действии. Так, например, для горизонтального элемента диаметром 325 мм с толщиной стенки 8 мм и массой 312,5 кг это условие может быть выполнено при плотности теплового потока 384 Вт/м^2 . Расчеты показывают, что в условиях Черного моря при степени прозрачности атмосферы 0,38 значение плотности теплового потока менее 384 Вт/м^2 достигаются в период 3 декабря (337 день, отсчитываемый с 1 января) по 6 января. То есть

при расчете усталостной долговечности в рассматриваемом нами примере следует принимать не 365 циклов в год, а 331. Следует также отметить, что в диссертационной работе И.В. Староконь показано, как именно сложное напряженное состояние, вызванное температурным воздействием, может привести к эквивалентным циклам растяжения. Покажем, как влияет на усталостную долговечность температурное воздействие.

В результате расчетов установлено, что ресурс с учетом влияния переменных напряжений, вызванных температурными напряжениями, составляет 20,96 лет, т.е. снижается приблизительно на 4 месяца. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для горизонтальных элементов температурное и коррозионное воздействие снижают долговечность элементов. Однако если температурное воздействие снижает долговечность на месяцы, то коррозионное снижает на годы.

Список литературы

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
2. Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Тиньгаев А.К. Определение остаточного ресурса опорного блока морской стационарной платформы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2012. – № 1 – С. 80–85.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность // Руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Староконь И.В. Методика оценки воздействия солнечного излучения на температурное состояние морских

стационарных платформ // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.

5. Староконь И.В. Исследование влияния окружающей среды на тепловое состояние конструктивных элементов опорных блоков морских стационарных платформ // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5

6. Староконь И.В. Методика исследования напряженного состояния сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (15). – С. 3394–3399.

7. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: www.science-education.ru/104-6605.

8. Староконь И.В. О влиянии коррозионного воздействия на развитие усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11 (часть 5). – С. 1214–1219.

References

1. Borodavkin P.P. Morskie neftegazovye sooruzheniya: uchebnyk dlya vuzov. Chast 1. Konstruirovaniye. M.: ООО «Nedra-Biznestsentr», 2006. 555 p.

2. Gubaydulin R.G., Gubaydulin M.R., Tingaev A.K. Opredeleniye ostatochnogo resursa opornogo bloka morskoy stacionarnoy platformy // Akademicheskyy vestnik UralNIIProekt RAASN, 2012 no. 1. pp. 80–85.

3. Serensen S.V., Kogaev V.P. i dr. Nesuschaya sposobnost i raschetnyye detaley mashin na prochnost // Rukovodstvo i spravochnoye posobie. M.: Mashinostroeniye, 1975. 488 p.

4. Starokon I.V. Metodika otsenki vozdeystviya solnechnogo izlucheniya na temperaturnoe sostoyaniye morskikh stacionarnykh platform // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 2.

5. Starokon I.V. Issledovaniye vliyaniya okruzhayushey sredy na teplovoe sostoyaniye konstruktivnykh elementov opornykh blokov morskikh stacionarnykh platform // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. no. 5.

6. Starokon I.V. Metodika issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya svarnykh soedineniy opornykh blokov morskikh stacionarnykh platform // Fundamentalnyye issledovaniya. 2013. no. 10 (15). pp. 3394–3399.

7. Starokon I.V. Osnovy teorii i praktiki obrazovaniya ustalostnykh treschin na morskikh neftegazovykh sooruzheniyah // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. no. 4; URL: www.science-education.ru/104-6605.

8. Starokon I.V. O vliyaniy korrozionnogo vozdeystviya na razvitiye ustalostnykh treschin na morskikh neftegazovykh sooruzheniyah // Fundamentalnyye issledovaniya, no. 11 (chast 5). 2012 god. pp. 1214–1219.

Рецензенты:

Бородавкин П.П., д.т.н., профессор, генеральный директор, АО «Интергаз», г. Москва;

Литвин И.Е., д.т.н., генеральный директор, ООО «СТД», г. Москва