

УДК 622.276.04

МЕТОДОЛОГИЯ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ С РЕАЛЬНЫМИ КОНСТРУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ (КЭ ОБ МСП)

¹Староконь И.В., ¹Надыров Р.И., ²Шолотонов А.В.

¹Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва,
e-mail: starokon79@mail.ru;

²ООО «Газпром трансгаз Москва», Брянское ЛПУ МГ, п. Глинщицево, e-mail: starokon79@mail.ru

В статье рассматриваются проблемы сопоставления результатов усталостных испытаний лабораторных образцов с усталостным поведением реальных конструктивных элементов опорных блоков морских стационарных платформ. На основе открытых данных из различных литературных источников предложена методика, при помощи которой становится возможным перенести результаты лабораторных исследований на реальные объекты. Проанализировано влияние масштабного фактора, шероховатости поверхности, чувствительности к концентрации напряжений и зависимости от вида технологической обработки. На основе выполненного анализа предложено применение эксплуатационно-технологического коэффициента, который позволяет учитывать взаимовлияние вышеперечисленных факторов. Рассчитаны параметры кривой усталости для колонн, горизонтальных поясов и раскосов опорного блока. Построены кривые усталости для сталей ВСтЗсп5 и 09Г2С в условиях морского месторождения.

Ключевые слова: усталостные трещины, ресурс, кривые усталости, морские стационарные платформы, опорные блоки, напряжения, масштабирование

METHODOLOGY OF COMPARING THE EXPERIMENTAL TESTS FOR FATIGUE WITH REAL STRUCTURAL ELEMENTS SUPPORT BLOCK FIXED OFFSHORE PLATFORMS

¹Starokon I.V., ¹Nadyrov R.I., ²Sholotonov A.V.

¹Russian State University of Oil and Gas named I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: starokon79@mail.ru;

²ООО «Gazprom transgaz Moskva», Brjanskoe LPU MG, p. Glinishevo, e-mail: starokon79@mail.ru

The article deals with the problem of comparing the results of fatigue tests of laboratory specimens with fatigue behavior of real structural elements supporting blocks of fixed offshore platforms. On the basis of open data from various literary sources proposed a method by which it is possible to transfer the results of laboratory tests on real objects. The influence of the scale factor, surface roughness, sensitivity to stress concentration and dependence on the type of hardening treatment. On the basis of the analysis provided the use of operational and technological factor, which takes into account the mutual influence of these factors. The parameters of the fatigue curve for columns, horizontal belts and braces the bearing block. Constructed fatigue curves for steels Vst3sp5 and 09G2S under the offshore field.

Keywords: fatigue cracks, resource, fatigue curves, fixed offshore platforms, support blocks, tension, scaling

Важной с практической точки зрения является задача масштабирования результатов, полученных при испытаниях лабораторных образцов на реальные объекты КЭ ОБ МСП. Современные исследования предлагают различные теории оценки влияния масштабного фактора в зависимости от шероховатости поверхности реального конструктивного элемента МСП и сварного соединения по сравнению с гладким образцом (шероховатость в пределах 0,16–0,32 мкм), реальных геометрических размеров КЭ и сварных соединений ОБ МСП по сравнению с лабораторными образцами, концентрацию напряжений, обусловленных видом сварного соединения и возможными дефектами, остаточными напряжениями в шве и околошовной зоне, зависимости от коэффициента асимметрии цикла, возможности наличия участков металла с разными механическими

свойствами, размерами поперечных сечений и т.д. Задачей данной статьи является масштабирование предела выносливости, полученного в результате экспериментальных исследований на реальные конструктивные элементы и сварные соединения опорного блока МСП. Следует отметить, что если для учета основных факторов, влияющих на масштабирование результатов экспериментов образцов металла КЭ МСП, разработаны и получили практическое подтверждение методики взаимовлияния различных факторов, то для сварных соединений такие методики разработаны недостаточно.

Рассмотрим методику учета взаимовлияния основных эксплуатационно-технологических факторов, влияющих на изменение значения предела выносливости и других параметров кривой усталости для основных конструктивных элементов ОБ МСП. В ка-

честве таких параметров, по мнению различных авторов [1–7], следует рассматривать соотношение размеров лабораторного образца и элементов КЭ ОБ МСП, асимметрию циклов напряжений, шероховатость поверхности и влияние методов поверхностного упрочнения. Результирующее влияние этих параметров на предел выносливости учитывается путем введения коэффициента взаимовлияния $K_{\sigma_{\text{КЭ МСП}}}$ по формуле:

$$\sigma_{-1 \text{ КЭ МСП}} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma_{\text{КЭ МСП}}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{-1 \text{ КЭ МСП}}$ – предел выносливости конструктивного элемента ОБ МСП; σ_{-1} – предел выносливости лабораторного образца материала; $K_{\sigma_{\text{КЭ МСП}}}$ – коэффициент взаимовлияния различных факторов.

В свою очередь коэффициент $K_{\sigma_{\text{КЭ МСП}}}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{\sigma_{\text{КЭ МСП}}} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \frac{1}{K_V}, \quad (2)$$

где K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений; $K_{d\sigma}$ – масштабный фактор; K_F – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости; K_V – фактор технологического упрочнения.

Величина K_{σ} определяется по формуле:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} (\alpha_{\sigma} - 1), \quad (3)$$

где q_{σ} – коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений, α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений. Исходя из имеющихся справочных данных примем $\alpha_{\sigma} = 2$, а σ_B – временное сопротивление, равное 490 МПа. Анализируя график на рис. 1, получим значение q_{σ} , равное 0,5, а значение K_{σ} в этом случае будет равно 1,5.

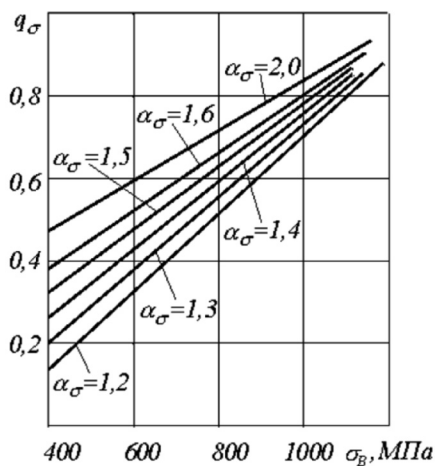


Рис. 1. Определение значения коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений

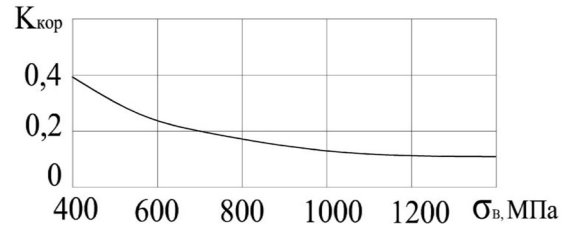


Рис. 2. Определение значения коэффициента влияния коррозии на шероховатость в условиях морского месторождения

Величину $K_{d\sigma}$ можно определить различными способами. Однако в работе [3] показывается, что при увеличении площади испытываемых образцов свыше 4000 мм², снижение величины предела выносливости практически отсутствует, и величину $K_{d\sigma}$ можно приближенно принять равной 0,6.

Величину K_F можно вычислить по формуле:

$$K_F = 1 - 0,22 \lg(R_z) \cdot \left(\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1 \right), \quad (4)$$

где R_z – шероховатость поверхности реального КЭ МСП, σ_B – временное сопротивление.

В нормативной документации указывается, что при наличии коррозионного воздействия K_F в расчетах должно быть заменено на $K_{\text{корр}}$, значение которого определяется по графику 2.

Значения K_V для сталей принимаются по данным табл. 1 в зависимости от вида упрочняющих обработок.

Таблица 1
Зависимость коэффициента K_V от вида упрочняющих обработок

Тип упрочнения	K_V
Закалка токами высокой частоты	1,2...1,6
Азотирование на глубину 0,1...0,4 мм	1,10...1,15
Цементация на глубину 0,2...0,6 мм	1,10...1,15
Обкатка поверхности роликами	1,10...1,25

В связи с отсутствием данных об упрочняющих обработках значение K_V принимается равным 1. Произведем расчет величины коэффициента, учитывающего основные эксплуатационно-технологические факторы для элементов, выполненных из стали 09Г2С:

$$K_{\sigma_{\text{д}}} = \left(\frac{1,51}{0,60,3} + \dots - 1 \right) = 4,36. \quad (5)$$

Следовательно, предел выносливости для конструктивных элементов опорного блока, выполненных из стали 09Г2С (раскосы и горизонтальные элементы), в усло-

виях морского месторождения составляет 55 МПа. Руководствуясь принципами, описанными выше, произведем расчет для элементов, выполненных из стали ВСт3Сп5 (колонны), предел прочности которых для труб, выполненных по ГОСТ 8696-74 составляет 372 МПа. Предел выносливости гладких образцов равняется 200 МПа. В результате проведенного расчета установлено значение $K_{\sigma_{кЭ} МСП}$ равное 3,91. Произведя соответствующие расчеты, получим для конструктивных элементов опорного блока, выполненных из стали ВСт3Сп5 (колонны), в условиях морского месторождения составляет 51 МПа.

Построим кривые усталости для конструктивных элементов МСП, для чего требуется определить показатель наклона кривой усталости m . Вычислим значение m по формуле [2]

$$m \approx \frac{1}{K_{\sigma_{д}}} \left(5 + \frac{\sigma_{вр}}{80} \right). \quad (6)$$

В результате расчета установлено, что для КЭ МСП из стали ВСт3Сп5 показатель наклона кривой усталости равен 2,46. А для КЭ МСП из стали 09Г2С показатель наклона кривой усталости равен 2,55.

Проведем расчеты для горизонтальных элементов и раскосов, выполненных из ста-

ли 09Г2С. Амплитуда напряжений определяется по формуле

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (7)$$

На основе выполненного анализа напряженного состояния ОБ МСП рассчитаем максимальные и минимальные напряжения в цикле [1, 4–7], а также их амплитуду для элементов КЭ МСП из стали 09Г2С (табл. 2).

Из таблицы следует, что максимальные напряжения достигаются как в раскосах, так и в горизонтальных элементах, минимальные значения цикла при высоте волны 13,9 м равняются – 216 МПа, а максимальные – 250 МПа. Следовательно, σ_a будет равен 233 МПа. Рассчитаем параметры кривой усталости для элементов КЭ МСП из стали 09Г2С. Определим число циклов до разрушения при амплитуде напряжений 233 МПа по формуле [2]

$$N = N_G \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (8)$$

где N_G – число циклов в точке перелома кривой усталости на уровне напряжений σ_{-1} , принимаемый в соответствии с данными [2–7], равным $6 \cdot 10^6$; σ_{-1} – предел выносливости; σ_a – амплитуда циклов напряжений.

Таблица 2
Характеристики циклов напряжений раскосов и горизонтальных поясов ОБ МСП при высоте волны 13,9 м и скорости ветра 49 м/с

Условия нагружения	Горизонтальные пояса					Раскосы				
	6	7	32	17	20	77	50	104	112	57
Напряжения элементов в отсутствие ВВН, МПа	6	7	32	17	20	77	50	104	112	57
Максимальные напряжения при прямом воздействии волновой нагрузки, МПа	71	75	92	250	182	209	198	267	344	120
Минимальные напряжения при прямом воздействии волновой нагрузки, МПа	-59	-61	-28	-216	-142	-55	-98	-59	-120	-6
Амплитуда циклов напряжения, МПа	65	68	60	233	162	132	148	163	232	63

Таблица 3
Характеристики циклов напряжений колонн ОБ МСП при высоте волны 13,9 м и скорости ветра 49 м/с

Условия нагружения	Колонны				
Напряжения элементов в отсутствие ВВН, МПа	45	43	18	32	51
Максимальные напряжения при прямом воздействии волновой нагрузки, МПа	250	242	115	197	173
Минимальные напряжения при обратном воздействии волновой нагрузки, МПа	-160	-156	-79	-133	-71
Амплитуда циклов напряжения, МПа	205	199	97	165	122

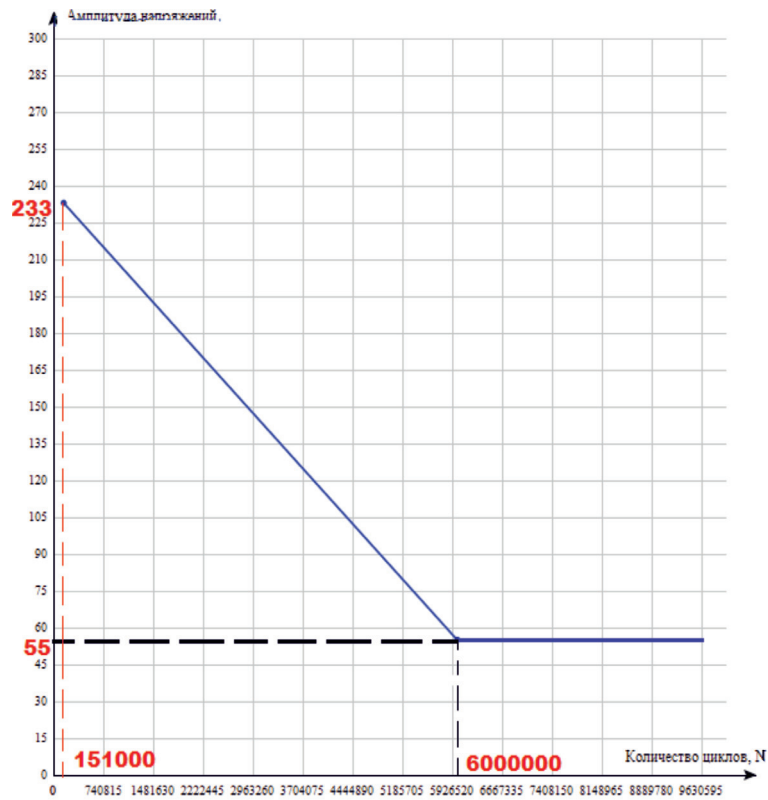


Рис. 3. Диаграмма усталостного разрушения КЭ МСП из стали 09Г2С в условиях морского месторождения

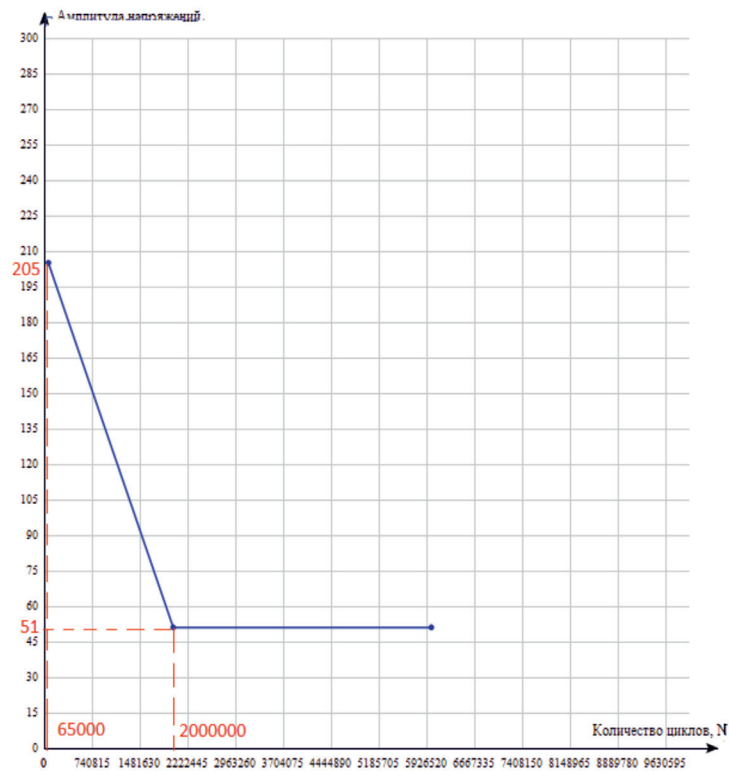


Рис. 4. Диаграмма усталостного разрушения КЭ МСП из стали ВСт3Сп5 в условиях морского месторождения

Подставив ранее полученные значения, получим:

$$N_{092ГС} = 6 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{55}{233} \right)^{2,55} = 1,51 \cdot 10^5. \quad (9)$$

Руководствуясь теми же соображениями, рассчитаем параметры кривой усталости для элементов из стали ВСт3Сп5 исходя из данных, приведенных в работе [2], примем $N_G = 2 \cdot 10^6$. Проанализируем данные о максимальных и минимальных значениях циклов (табл. 3) [1, 4–7]:

В результате получим:

$$N_{ВСт3Сп5} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{51}{205} \right)^{2,46} = 6,5 \cdot 10^4. \quad (10)$$

Таким образом, диаграммы усталости для конструктивных элементов ОБ МСП приобретут следующий вид (рис. 3–4).

Важное практическое значение имеет коэффициент асимметрии цикла ϕ , при помощи которого устанавливают эквивалентные амплитуды напряжений, которая вычисляется по формуле

$$\sigma_{аэ КЭ МСП} = K_{\sigma КЭ МСП} \sigma_a + \phi \sigma_m. \quad (11)$$

В соответствии с рекомендациями, приведенными в коэффициент асимметрии цикла, выбирается в зависимости от предела прочности по данным [2] или приближенно равным 0,2 для легированных ста-

лей. Таким образом, в статье предложена методология, позволяющая сопоставить результаты экспериментальных исследований с реальными объектами КЭ МСП. По соглашению между авторами авторское право и все другие права, связанные с защитой диссертации по материалам данной статьи, принадлежат Староконь И.В.

Список литературы

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения. Учебник для вузов. Часть 1. Конструирование – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
2. Березин И.Я., Чернявский О.Ф. Сопротивление материалов. Усталостные разрушения металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях: Учебное пособие. Под общей редакцией О.Ф. Чернявского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002.
3. Клыкков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
4. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: <http://www.science-education.ru/104-6605>.
5. Староконь И.В. Теоретические основы и практические результаты исследования напряженного состояния опорных блоков морских стационарных платформ // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–5. – С. 941–946.
6. Староконь И.В., Фролова Н.В., Романенко О.А., Болбот Н.В. Коррозионные процессы в условиях морских нефтегазовых месторождений и их влияние на усталостное трещинообразование // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – С. 81–84.
7. Староконь И.В. О влиянии коррозионного воздействия на развитие усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях (МНГС) // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11–5. – С. 1214–1219.