УДК 622.276.04

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЕМ ПО ОЦЕНКЕ РЕСУРСА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

¹Староконь И.В., ²Радкевич В.В., ³Литвин И.Е.

¹Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, e-mail: starokon79@mail.ru; ²ООО «ИНЭКО-А», Москва, e-mail: ink90@pochta.ru;

³ООО «СТД – Системы технической диагностики», Москва, e-mail: litvin igor@inbox.ru

В статье рассматриваются вопросы оценки усталостной долговечности (УД) сварных соединений морских стационарных платформ (МСП). Особое внимание уделяется УД восстановленных (отремонтированных) сварных соединений МСП. Изначально с использованием программного комплекса StructureCAD было исследовано напряженное состояние сварных соединений опорных блоков МСП при действии на них ветроволновых нагрузок, создающих переменные напряжения и приводящих к усталостному разрушению сварных соединений. Это исследование позволило обосновать технические условия проведения эксперимента. Что позволило разработать алгоритм проведения эксперимента и создать автоматизированную эксперимента. Что позволило разработать алгоритм проведения эксперимента и создать автоматизированную эксперимента пальную установку под управлением программного комплекса Labview. Задачей эксперимента являлась оценка усталостной долговечности как исходных, так и восстановленных трубчатых соединений опорного блока морской стационарной платформы. В результате проведен эксперимент, позволивший построить кривую усталости для восстановленных трубчатых соединений сварных соединений «К»-типа опорных блоков морских стационарных платформ.

Ключевые слова: морские стационарные платформы, переменные, циклы, напряжения, колонны, сварные соединения «К»-типа, опорный блок, волновая нагрузка, усталость

AUTOMATED CONTROL COMPLEX OF EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATION OF RESOURCE RESTORED TUBULAR WELDED JOINTS OF OFFSHORE PLATFORMS

¹Starokon I.V., ²Radkevich V.V., ³Litvin I.E.

¹Russian State oil and gas university named after I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: starokon79@mail.ru; ²OOO «INEKO-A», Moscow, e-mail: ink90@pochta.ru;

³OOO «STD – System of technical diagnostics», Moscow, e-mail: litvin_igor@inbox.ru

The article considers issues of evaluation of fatigue durability (UD) of welded joints of fixed offshore platforms (SMEs). Special attention is given to UD restored (repaired) welded joints of SMEs. Initially with the use of program complex was investigated Structure CAD stress state of welds reference blocks SME at action on them of wind and wave loads that create variable voltage and leading to fatigue failure of welded joints. This study allowed us to validate the technical conditions of the experiment. That allowed us to develop the algorithm of the experiment and to create an automated experimental setup running the software package Labview. The objective of the experiment was to evaluate fatigue life, the original and the restored tubular bearing unit fixed offshore platforms. As a result of the experiment, which allowed us to build the fatigue curve for the restored tubular welded joints «K»-type supporting blocks of fixed offshore platforms.

Keywords: fixed offshore platforms, stress, loops, voltage, columns, welds, t-sections, base plate, wave load, fatique life

В настоящее время РФ активно ведется добыча нефти и газа на морских нефтегазовых месторождениях. Ключевым элементом этой добычи являются морские стационарные платформы, многие из которых эксплуатируются уже более 30 лет [1, 2, 4–6]. Сложные условия эксплуатации этих платформ приводят к тому, что конструктивные элементы и сварные соединения получают недопустимые повреждения. Если конструктивные элементы опорных блоков заменяются, то сварные соединения ремонтируются. Однако оценить ресурс таких отремонтированных (восстановленных) соединений не представляется возможным. Учитывая вышесказанное, было проведено экспериментальное исследование, которое заключалось в доведении экспериментального сварного соединения в результате создания в нем амплитуд переменных напряжений до первичного разрушения, его последующем восстановлении и повторном разрушении. Как показали расчеты, напряженное состояние сварного соединения опорного блока хорошо описывается значениями амплитуд первых главных напряжений. При этом необходимо учитывать влияние масштаба образцов для испытания

* *

и реальных сварных соединений опорного блока, шероховатости поверхности, асимметрию циклов напряжений и остаточных напряжений. Для решения этих задач на примере исследуемого «К»-типа соединения (рис. 1, а), расположенного в зоне периодического смачивания, определим величины номинальных напряжений, а затем получим значения главных напряжений, действующих в сварном соединении. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса StructureCAD. Важно обратить внимание на тот факт, что после прохождения вершиной волны обтекаемого элемента направление нагрузки меняет свой знак. Поэтому в табл. 1 приведены значения напряжений как для случая напряжения от прямого воздействия волновой нагрузки, так и для вектора напряжения при обратном направлении действия волновой нагрузки, что позволяет определить асимметрию цикла нагружения. Рассмотрим сварное соединение «К»-типа (раскос), образованное сопряжением двух горизонтальных элементов диаметром 325 мм с колонной с диаметром 720 мм (рис. 1, б). При помощи программного комплекса StructureCAD определим действующие нормальные и касательные напряжения, получим значения главных напряжений, действующих в сварном соединении. Действуя аналогичным образом и в соответствии с [1], меняя направление вектора действия ветро-волновой нагрузки (BBH), проведя соответствующее компьютерное моделирование, получим значения напряжений, действующих в сварном соединении, а затем рассчитаем значения главных напряжений как при прямом, так и при обратном воздействии ВВН (табл. 1).

Значения главных напряжений

при прямом и обратном воздействии ВВН,

действующие соединении «К»-типа

Таблица 1

Главные напря-	Воздействие ветро-волновой нагрузки, МПа						
жения	прямое	обратное					
σ_1	290,4	-210,2					
σ_2	15,62	-13,93					
$\sigma_{_3}$	6,8	-5,06					

Знак минус или плюс свидетельствует о направлении действия нагрузки. Из результатов расчета видно, что характеристики цикла напряжений являются асимметричными, что объясняется значительными напряжениями, вызванными действием сил тяжести как самой платформы, так и весом распределенного на ней оборудования и совпадением направления действия векторов их главных напряжений. Проведем численно-аналитическое моделирование экспериментального процесса и спрогнозируем предельные амплитуды главных напряжений с учетом влияния шероховатости поверхности и масштабного фактора,



Рис. 1. а – сварное соединение «К» опорного блока морской стационарной платформы; б – местоположение исследуемого «К»-типа соединения опорного блока морской стационарной платформы

описанного в работах Н.А. Клыкова [3]. После этого рассчитаем значения предельных амплитуд главных напряжений с учетом влияния асимметрии цикла главных напряжений, характеризуемых значениями коэффициентов $R_{\sigma 1}$, $R_{\sigma 2}$, $R_{\sigma 3}$, и построим кривую усталости для ремонтных сварных соединений. Построим модель экспериментальной установки в программном комплексе StructureCAD (рис. 2). По результатам численно-аналитического моделирования была построена экспериментальная установка, показанная на рис. 3.



Рис. 2. Аналитическая модель экспериментальной установки в программном комплексе StructureCAD



Рис. 3. Фактическая экспериментальная установка, моделирующая соединение «К»-типа

Определим номинальные и предельные напряжения. Учитывая тот факт, что при выбранном способе нагружения действие нагрузки происходит вдоль одной вертикальной оси и одной плоскости, то с достаточной для практики степенью точности можно принять значение первого главного напряжения по формуле

$$\sigma_1 = \frac{6M_2}{\beta kL^2},\tag{1}$$

где M_{2} – величина экспериментального изгибающего момента; β – коэффициент, принимаемый в зависимости от вида сварки, для ручной электродуговой сварки $\beta = 0,7; k - катет шва,$ k = 0,0015 м; L - длина сварного соединения, L = 0,876 м. Испытания проводились на уровне напряжений 82 и 115 МПа. Для сопоставления результатов, приведенных в [3], и методики Н.А. Клыкова рассчитаем предел выносливости сварного соединения «К»-типа в условиях первого разрушения. Как показало проведенное численно-аналитическое моделирование, основной вклад в определение предельных амплитуд напряжения вносят первые главные напряжения. Второе и третье главные напряжения лишь незначительно уточняют полученный результат. Полученные значения предельных амплитуд главных напряжений приведены в табл. 2.

При оценке усталостной долговечности пользуются такими понятиями, как размах напряжений [6], равный разнице максимального и минимального напряжений цикла, и понятием амплитуды цикла, равной половине разницы максимального и минимального напряжений цикла. И в том и в другом случае результаты аналогичны и соответствуют значениям, полученным в диссертационном исследовании И.В. Староконь по методике Н.А. Клыкова. Поэтому предел выносливости до первого разрушения σ_1 можно приближенно принять равным величине предельной амплитуды первого главного напряжения, равной 25 МПа. Следующим шагом является проведение эксперимента второго типа. Оценим ресурс сварных соединений, подвергнутых ремонту. В дальнейшем будем называть их восстановленными.

Таблица 2

Результаты расчета предела выносливости сварного соединения «К»-типа по методике Н.А. Клыкова [3]*

$\sigma_{_{1a}}$	$R_{\sigma}^{\circ c \tau}$	$M_{ m max}^{ m oct}$	C_1^{oct}	К	α	η	η	η	σ1	σ_{1a}^{π}
113	0,56	2	0,53	1,41	0,5	0,1	0,4	0,1	45	13,3

П р и м е ч а н и е . *Обозначения, принятые в табл. 2: σ_{1a} – предельная амплитуда первого главного напряжения; R_{σ}^{ocr} – коэффициент асимметрии остаточных напряжений; M_{max}^{ocr} , C_1^{ocr} , К, α – вспомогательные коэффициенты; η_1 , η_2 , и η_3 – коэффициент влияния соответственно растягивающих, сжимающих и изгибающих нормальных напряжений; σ_{-1} – предел выносливости; σ_{1a}^{n} – предельная амплитуда первого главного напряжения. Обозначения и методы расчета всех значений, приведенных в табл. 2, детально приведены в работе [3].





Puc. 4.

а – пневматический цилиндр; б – управляющий модуль эксперимента;
 в – блок переключения вектора действия экспериментальной нагрузки;
 г – модуль контроля значений экспериментального давления

Теория для второго вида эксперимента отсутствует, предел выносливости сварных соединений, подвергнутых ремонту, невозможно определить аналитически. В связи с этим И.В. Староконь спроектировал и построил экспериментальные установки, на которых последовательно проводилось первичное, а затем и повторное разрушение отремонтированных соединений. В качестве модуля управления использовался алгоритм, реализованный в программном комплексе LabVIEW. Алгоритм управления описан в диссертационной работе И.В. Староконь, а управляющий модуль приведен на рис. 4, б. Эксперимент проводился следующим образом. От трубопровода высокого давления со сжатым воздухом был проведен отвод к модулю контроля значений экспериментального давления (рис. 4, г). В этом модуле давление понижалось до заданной величины, установленной в управляющем модуле эксперимента (рис. 4, б).

FUNDAMENTAL RESEARCH № 11, 2015 🗖

Затем давление поступало в блок переключения вектора экспериментальной нагрузки (рис. 4, в). А после поступало в пневматический цилиндр (рис. 4, а), в котором оно преобразовалось в силу определенной величины, которая под управлением блока переключения развивалась последовательно по вертикальной оси в разных направлениях. Эта нагрузка и создавала разрушающий экспериментальный момент в исследуемом сварном соединении. Оценка пределов выносливости проводилась по формуле Гольцева [3, 5]:

$$\sigma_{R} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_{1}^{2} N_{1} - \sigma_{2}^{2} N_{2}}{N_{1} - N_{2}}},$$
 (2)

где
 σ_1 и σ_2 — амплитуды переменных напряжений;
 N_1 и N_2 — число циклов до разрушения на соответствующих амплитудах напряжений. Эксперимент заключался в следующем. Предыдущие испытания проводились до появления трещины глубиной 2-3 мм или более, так как при появлении трещины подобных размеров в некоторых случаях ее разрастание в магистральную трещину при тех же условиях нагружения происходило менее чем за 500-1000 циклов и не всегда удавалось вовремя остановить процесс перехода трещины глубиной 2-3 мм в магистральную трещину. После образования этой трещины соединение подвергалось ремонту и еще раз доводилось до разрушения.

Была испытана серия из четырех образцов отремонтированных тавровых сварных соединений при амплитудах напряжений 82 и 115 МПа. Полученные результаты приведены в табл. 3.

В результате был вычислен предел выносливости, равный <u>46 МПа</u>. Подстановка значений минимальных значений числа циклов, разово полученных в ходе экспериментов, не сильно повлияла на конечный результат, составивший 45,29 МПа. Действуя по методике Н.А. Клыкова, сопоставим полученный экспериментальный результат с результатом для реального сварного соединения. Рассчитаем предельные амплитуды главных напряжений, коэффициенты влияния нормальных напряжений и другие вспомогательные величины с учетом влияния остаточных напряжений (табл. 4).



Рис. 5. Трещина в сварном соединении экспериментальной установки



Рис. 6. Кривая усталости восстановленного сварного соединения МСП

Таблица 3

Число циклов *N* до разрушения, полученных в ходе испытания отремонтированного сварного соединения «К»-типа

Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Среднее значение	Дис- персия	Среднеква- дратическая погрешность	Довери- тельный интервал	Результат эксперимента		
Амплитуда напряжений $\sigma_1 = 82 \text{ M}\Pi a$										
11951	1951 10769 12496 12601 11951 11953 840 420						11953 ± 420			
Амплитуда напряжений σ ₂ = 115 МПа										
4332	3975	4672	4348	4332	284	142	453	4332 ± 453		

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 11, 2015

Таблица 4

Результаты обработки экспериментов, полученных в ходе испытания отремонтированного сварного соединения «К»-типа и расчета предельной амплитуды первого главного напряжения (обозначения см. в табл. 2)

σ_{la}	$R_{\sigma^0}^{\circ c au}$	$M_{ m max}^{ m oct}$	C_1^{oct}	К	α	η_1	η2	η	σ_1	σ_{1a}^{π}
113,5	0,56	2	0,53	1,41	0,52	0,1	0,4	0,1	45	13,3

Таким образом, как показали расчетноэкспериментальные исследования, предел выносливости сварного соединения «К»типа соединения после ремонта составляет **13.3 МПа.** Аппроксимирующее уравнение кривой усталости и значение точки перелома кривой усталости N_G рассчитаем в программном комплексе Wolpram:

$$\sigma_a = -12,4746 \ln (1,44438 \cdot 10^{-7} \cdot N),$$
 (3)

Решая это уравнение относительно предела выносливости на уровне 13,3, получим точку перелома кривой усталости, в которой N_G равно приблизительно $3 \cdot 10^6$. Построим кривую усталости восстановленного сварного соединения «К»-типа (рис. 6) с учетом исследований в работе [6]. Таким образом, были установлены параметры кривой усталости отремонтированного сварного соединения «К»-типа опорного блока морской стационарной платформы, что позволит в будущем рассчитать их ресурс.

Список литературы

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.

2. Колгушкин А.В., Беляев Н.Д. Влияние природных факторов на скорость коррозии морских ГТС // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2009.

 Клыков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.

 Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.

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

6. Староконь И.В. Усталостная долговечность восстановленных тавровых сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ: справочник // Инженерный журнал. – 2015. – № 7. – С. 51–56.

References

1. Borodavkin P.P. Morskie neftegazovye sooruzheniya: uchebnik dlya vuzov. CHast 1. Konstruirovanie. M.: OOO «Nedra-Biznescentr», 2006. 555 p.

2. Kolgushkin A.V., Belyaev N.D. Vliyanie prirodnyh faktorov na skorost korrozii morskih GTS // Predotvrashchenie avarij zdanij i sooruzhenij. 2009.

3. Klykov N.A. Raschet harakteristik soprotivleniya ustalosti svarnyh soedinenij-M.: Mashinostroenie, 1984 g. 160 p.

4. 4Starokon I.V. Osnovy teorii i praktiki obrazovaniya ustalostnyh treshchin na morskih neftegazovyh sooruzheniyah // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. no. 4.

5. Starokon I.V. Metodika issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya svarnyh soedinenij opornyh blokov morskih stacionarnyh platform // Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 10 (15). pp. 3394–3399.

6. Starokon I.V. Ustalostnaya dolgovechnost vosstanovlennyh tavrovyh svarnyh soedinenij opornyh blokov morskih stacionarnyh platform//Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. 2015. no. 7. pp. 51–56.

Рецензенты:

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

Безкоровайный В.П., д.т.н., профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.