

УДК 622.276.04

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Староконь И.В., Шишкин С.В.

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 65), e-mail: starokon79@mail.ru

ООО «СТД-Системы технической диагностики», Москва, Россия (123242, г. Москва, ул. Заморенова, д. 12), e-mail: shishkin1979@gmail.com

В настоящее время проблема оценки ресурса сварных соединений после их ремонта имеет важнейшее практическое значение. Особую важность эти вопросы приобретают при расчете усталостной долговечности сварных соединений морских стационарных платформ. Это связано с тем, что если негодные к дальнейшей эксплуатации элементы платформы заменяются, то сварные соединения ремонтируются. И оценить ресурс подобных ремонтных соединений в настоящее время не представляется возможным. Как было установлено в результате экспериментов, выполненных Староконем И.В., диаграмма усталостного разрушения существенным образом отличается от диаграммы соединений только введенных в эксплуатацию. Исследования проводились как для тавровых соединений, так и для раскосов. Добившись первого разрушения экспериментального сварного соединения, это соединение восстанавливали, после чего его вновь подвергали воздействию экспериментальной нагрузки и доводили до следующего разрушения. На основе проведенных исследований была построена усталостная диаграмма для восстановленных сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ.

Ключевые слова: усталостные трещины, морские стационарные платформы, переменные напряжения, отремонтированные, восстановленные сварные соединения, кривая усталости.

EXPERIMENTAL AND CALCULATED ASSESSMENT OF THE FATIGUE LIFE OF REPAIRED WELDED JOINTS BASIC BLOCKS OF FIXED OFFSHORE PLATFORMS

Starokon I.V., Shishkin S.V.

Russian State oil and gas university named after I.M. Gubkin (119991, Moscow, Leninsky prospect, 65), e-mail: starokon79@mail.ru

ООО «STD-System of technical diagnostics» (123242, Moscow, Zamorenova str., 12), e-mail: shishkin1979@gmail.com

At present the problem of resource assessment of welded joints after repair has important practical significance. Of particular importance to such issues in the calculation of fatigue life of welded joints of offshore platforms. This is because if unfit for further use platform elements are replaced, the welds are repaired. And evaluate the resource such repair compounds currently not possible. As it was established as a result of experiments performed by Stroking I. V., chart fatigue fracture differs significantly from the diagrams only put into operation. The research was carried out as for of t-joints and braces. Having achieved the first experimental destruction of the welded connection, the connection was restored, after which it was again subjected to experimental load and brought to the next fracture. On the basis of the research was built fatigue chart for restored welded joints basic blocks of fixed offshore platforms.

Keywords: fatigue cracks, fixed offshore platforms, variable stress, refurbished, remanufactured welded joints, fatigue curve.

Существующие и строящиеся в настоящее время для освоения морских нефтегазовых месторождений морские стационарные платформы (МСП) характеризуются высокой стоимостью строительства, сложностью эксплуатации, удаленностью от суши и большим количеством персонала, располагаемого на крайне ограниченной территории. Аварии на этих сооружениях способны привести к массовым человеческим жертвам и существенному экологическому и экономическому ущербу. РФ имеет значительные ресурсы нефти и газа,

расположенные на морских участках. Особенно необходимо отметить тот факт, что наша страна имеет доступ к существующим и перспективным морским нефтегазовым месторождениям Черного моря, добыча на которых ведется с использованием морских стационарных платформ. Некоторые из этих платформ были установлены во времена СССР и продолжали более 20 лет эксплуатироваться Украиной. Общий же срок эксплуатации этих платформ в некоторых случаях составляет более 30 лет [1; 3-9]. Так как МСП эксплуатируется в неблагоприятных условиях окружающей среды, характеризуемой высокой коррозионной активностью, значительными нагрузками и другими неблагоприятными воздействиями, они подвергаются значительному механокоррозионному износу, и эксплуатация этих конструкций может быть небезопасной. Анализ аварийности морских платформ за последние 30 лет показал, что, несмотря на различные передовые технические решения по обеспечению безопасности МСП, уровень их аварийности остается высоким. Частично это объясняется человеческим фактором, однако существенная часть этих аварий связана с физическим износом оборудования. Длительная эксплуатация МСП приводит к необходимости введения усталостного критерия. Анализ открытых литературных источников показал, что в качестве такого критерия можно принять возникновение усталостной трещины глубиной 2-3 мм, т.к. при достижении подобных размеров, что доказано на основе экспериментов с крупногабаритными образцами, прочность этих образцов при наличии трещины указанной глубины резко падала, и их разрушение происходило при напряжениях, значительно меньше номинальных [2]. В различных опытах, проводимых отечественными и зарубежными авторами, усталостные трещины вызывали разрушение при низких номинальных напряжениях только после того, как их глубина превышала 3 мм. Все образцы с меньшими глубинами трещин, как это было доказано экспериментально, разрушались вне плоскости усталостных трещин при напряжениях, близких к временному пределу сопротивления материала. Образцы же с трещинами глубиной приблизительно 3 мм во всех проведенных экспериментах разрушались по сечениям, включавшим трещины, и при напряжениях, не достигших предела текучести материала. Усталостные трещины морских стационарных платформ чрезвычайно опасны и при определенных условиях приведут к разрушению платформы. Как это хорошо освещено в отечественной и зарубежной литературе, развитие усталостных трещин происходит за счет действия периодически изменяющихся нагрузок и воздействий, которые создают переменные напряжения в сварных соединениях и основных конструктивных элементах опорного блока с их последующим разрушением. Поэтому определение срока безопасной эксплуатации как сварных соединений, так и основных конструктивных элементов платформы, является важной практической задачей. По мнению авторов, решение проблемы оценки усталостной

долговечности сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ лежит в области разработки такой методики, основанной на проведении экспериментальных исследований, на специально разработанных экспериментальных установках (ЭУ), которые позволяют смоделировать процесс усталостного разрушения с учетом подобия размеров, геометрической формы и нагружения. Такие работы проводились как в России, так и за рубежом. Результаты этих работ хорошо сопоставляются между собой [3-5]. Однако результаты, полученные в этих документах, распространяются только на вводимые в эксплуатацию опорные блоки. Авторы считают необходимым отметить одну очень важную особенность эксплуатации МСП. Если не подлежащие дальнейшей эксплуатации элементы заменяются, то сварные соединения опорного блока, которые по результатам технической диагностики признаны не годными к дальнейшей эксплуатации, ремонтируются. В связи с этим возникает вопрос: как соотносится усталостная долговечность этих восстановленных (отремонтированных) сварных соединений по сравнению с новыми? Ведь действие вышеуказанных нормативных документов распространяется только на новые сварные соединения. По мнению авторов, решить этот вопрос можно путем проведения экспериментов. На основе экспериментов будут получены данные для построения кривой усталости восстановленных (отремонтированных) сварных соединений разного типа. К настоящему времени экспериментальные методы оценки усталостной долговечности в достаточной мере апробированы на практике. Основываясь на этом опыте, были разработаны ГОСТ 19533-74, РД 50-686-89 и др., содержащие в себе рекомендации по проведению усталостных испытаний. На базе методик проведения испытаний на усталость, описанных в этих нормативных документах, Староконь И.В. спроектировал и реализовал два вида экспериментальных установок, на которых изучалась усталостная долговечность сварных соединений ОБ МСП. Первая ЭУ моделировала тавровое соединение (рис. 1), а вторая раскос (рис. 2). В зависимости от задачи эксперимента выбирались схемы задания экспериментальной нагрузки. Так, для исследования тавровых сварных соединений ЭУ представляла собой вертикальную трубу, моделирующую колонну, в которую сделана прямая врезка под углом 90 градусов - другая труба (рис. 1), моделирующая горизонтальный элемент платформы. К горизонтальному элементу на строго определенном расстоянии прикреплялся пневматический цилиндр, создававший экспериментальную нагрузку. При таком воздействии в сварном соединении возникал экспериментальный момент от сосредоточенной силы, который под действием переменного хода пневмоцилиндра вызывал циклически меняющееся напряжение в сварном соединении. Помимо этого, в комплекс входили блоки управления, трубопровод со сжатым воздухом высокого давления, компрессоры, системы контроля давления и блок регулирования величины экспериментальной нагрузки. Управление работы

установки осуществлялось за счет автоматизированной системы управления Лабвью. По аналогии была разработана экспериментальная установка - моделирующее соединение типа раскос. Ее отличие от вышеописанной установки заключалось в наличии еще одной врезки и второго пневматического цилиндра. Угол между прямой врезкой и дополнительной равен 57° (рис. 2) и соответствует реальному сварному соединению платформы.



Рис. 1. ЭУ таврового соединения.



Рис. 2. ЭУ раскос.



Рис. 3. Усталостная трещина в ЭУ таврового соединения.

Эксперимент состоял в следующем. При помощи пневматического цилиндра в исследуемом соединении создавалось переменное напряжение вплоть до его разрушения (рис. 3) или возникновения в нем трещины глубиной 2-3 мм. Отметим, что во всех случаях трещина в исследуемых соединениях распространялась сначала вглубь, а затем при очень малом количестве циклов переменной нагрузки распространялась в кольцевом направлении с последующим разрушением всей конструкции. После этого соединение ремонтировалось и тем же способом заново доводилось до разрушения. Уровни переменных напряжений и количество циклов до возникновения усталостной трещины глубиной 2-3 мм фиксировались. Разрушение сварного соединения происходило за счет действия изгибающего момента. Для таврового соединения экспериментальный изгибающий момент составлял 5 и 8 КНм, что создавало в сварном соединении напряжения в 54 и 92 МПа. Для соединения типа раскос задавался суммарный изгибающий момент, возникающий от действия двух пневматических цилиндров. С целью предотвращения быстрого разрушения на испытательных пневматических цилиндрах экспериментальной установки типа раскос была задана экспериментальная нагрузка 1,25 кН, обеспечивающая суммарный изгибающий момент 2,5 и 1,75 кН, создающая суммарный изгибающий момент 3,5 кНм. Вычисленный по формуле Гольцева предел выносливости для таврового соединения составлял 46 МПа, а для соединения раскос 45 МПа. После этого Староконь И.В. осуществил масштабирование

результатов [9], полученных при испытаниях на экспериментальной установке по отношению к реальным сварным соединениям ОБ МСП. Современные исследования предлагают различные теории учета масштабного фактора в зависимости от шероховатости поверхности сварного соединения по сравнению с гладким образцом (шероховатость в пределах 0,16-0,32 мкм), геометрических размеров 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. Для приближения условий эксперимента к фактическим автором были соблюдены условия подобия по форме исследуемых элементов, виду нагружения, толщине стенки элементов, сварных соединений и механических свойств исследуемых материалов. Ввиду значительных размеров реальных колонн и горизонтальных элементов морской платформы не удалось соблюсти только условие подобия по диаметру конструктивных элементов и длине исследуемых швов. А это повлекло за собой изменение площади поперечного сечения сварного соединения к моменту сопротивления сечения при изгибе, что напрямую влияет на его напряженное состояние. Поэтому возникла задача об отношении полученных экспериментальных результатов к реальному сварному соединению морской платформы. Как известно, масштабный фактор может быть обусловлен влиянием на процесс разрушения суммарной упругой энергии, накопленной в нагружаемой системе. Как показывают экспериментальные данные, с увеличением размера образца увеличивается скорость распространения трещины в результате большего запаса упругой энергии у образцов большего размера. Однако в некоторый момент времени зависимость усталостных характеристик от размеров образца и фактического размера сварного соединения исчезает, т.е. другими словами существует некоторая граница, после перехода которой различия усталостных характеристик испытываемых образцов и фактических сварных соединений исчезают. Так, в работе [2], основанной на экспериментальных исследованиях, утверждается, что при площади поперечного сечения исследуемых образцов более 4000 мм² коэффициент масштабирования может быть принят равным 0,6. Современные энергетические теории позволяют скорректировать это значение коэффициента масштабирования, применительно к сварным соединениям опорного блока МСП можно использовать коэффициент 0,58.

Исследуемые сварные соединения опорных блоков МСП состоят из горизонтальных элементов из труб диаметром 325, 426 или 530 мм, врезанных под углом 90° в вертикальную стойку (колонну) из труб диаметром от 720 до 1480 мм. Соединение типа раскос отличается от таврового дополнительным трубным элементом, присоединенным к горизонтальному

элементу под углом 57° . Анализ материалов проектов Суботтинского месторождения, сварные соединения выполнены в соответствии с ГОСТ 16037-80 и представляют собой равнобедренный треугольник с катетами $k_{fz}=1,56$ см. Для любых угловых соединений, как тавровых, так и раскосов, считается, что эти сварные соединения работают на условный срез. Разрушение происходит по наименьшей площади скольжения шва как при действии изгибающего и крутящего моментов, так и при воздействии продольной или поперечной силы. Расчетное сечение углового шва принимается в виде равнобедренного треугольника, вписанного в сечение сварного шва. Катет треугольника принимается равным высоте шва, и наплывы при этом не учитываются. Проанализируем прочностные характеристики сварного соединения опорного блока. Анализ материалов проектов показал, что при строительстве опорных блоков для сварки элементов, выполненных из сталей ВСтЗСсп5, применялись электроды марки Э42А, марки УОНИ-13/55. Предел прочности сварных соединений, выполненных по ГОСТ 9467-75, составляет 412 МПа. А для сварных соединений, выполненных из труб стали 09Г2С (Д) электродами Э50А марки УОНИ-13/55 по ГОСТ 9467-75, предел прочности сварного шва должен составлять 490 МПа. Совершенно очевидно, что для большего соответствия экспериментального образца реальному объекту должны быть использованы не только геометрически подобные образцы с подобными условиями нагружения, но и материалы, обладающие схожими механическими характеристиками. Поэтому при проведении эксперимента были использованы сварочные материалы, обеспечивающие подобные значения предела прочности, марки Е4903-Р по ISO 2560-2009, обеспечивающие предел прочности сварного соединения равным 490 МПа. Для более точной оценки предела выносливости, помимо соотношения размеров образцов, необходимо также учитывать такие факторы, как шероховатость, асимметрия циклов напряжений и остаточные напряжения. В работе [2] приведена подробная методика обработки экспериментальных результатов с учетом описанных выше факторов, которая и была использована автором. Важно обратить внимание на тот факт, что большую роль в определении предела выносливости играют остаточные напряжения. В зависимости от размера свариваемых элементов остаточные напряжения могут создавать линейное, плоское или объемное напряженное состояния. Как это показано в работе [2], в элементах с толщиной менее 30 мм и имеющих значительную длину остаточные напряжения от сварки создают плоское напряженное состояние. При воздействии внешних нагрузок на сварной элемент возникают пластические деформации и происходит удлинение волокон (получивших во время сварки пластические деформации сжатия). Вследствие этого после разгрузки начальные остаточные напряжения, если по линии действия и знаку они совпадают с напряжениями от внешней нагрузки, при линейном напряженном состоянии уменьшаются и определяются как разность

между пределом текучести и величиной напряжения от максимальной нагрузки. В результате проведения описанных выше экспериментальных исследований построена обобщенная кривая усталости для восстановленных (отремонтированных) сварных соединений опорного блока морской стационарной платформы (рис. 4).

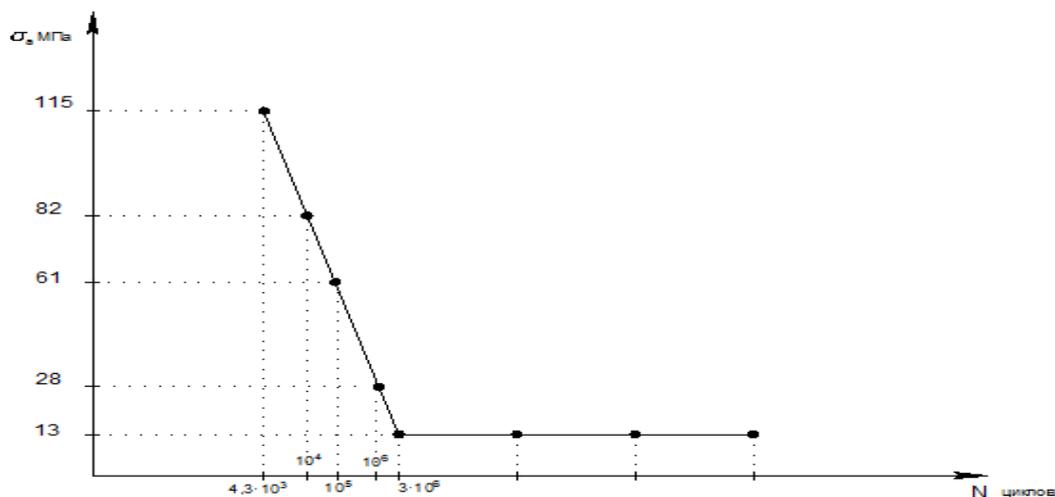


Рис. 4. Кривая усталости отремонтированного (восстановленного) сварного соединения опорного блока морской стационарной платформы.

На основе выполненного Староконом И.В. эксперимента им совместно с Шишкиным С.В. была выполнена математическая обработка полученной Староконом И.В. кривой усталости, в результате чего получена следующая формула для оценки усталостной долговечности сварного соединения опорного блока морской стационарной платформы:

$$\sigma_a = -14,5539 \cdot \ln(1,51603 \cdot 10^{-7} N), \quad (1)$$

где σ_a - амплитуда переменных напряжений, N - количество циклов.

В настоящее время исследования продолжаются, и по мере получения новых экспериментальных данных автором будут опубликованы уточненные результаты экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения : учебник для вузов. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – Ч. 1. Конструирование. - 555 с.
2. Клыков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. - М. : Машиностроение, 1984. – 160 с.
3. Староконь И.В. Методика исследования напряженного состояния сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3394-3399.

4. Староконь И.В. Анализ отечественной нормативной документации по безопасности эксплуатации морских нефтегазовых сооружений (МНГС) // Естественные и технические науки. – 2009. – № 6. – С. 346-347.
5. Староконь И.В. Анализ зарубежных норм оценки рисков морских нефтегазовых сооружений на основе изучения нормативной документации // Естественные и технические науки. – 2009. – № 6. – С. 343-345; DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций. – Norway : DNV, 2008. – 158 с.
6. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.
7. Староконь И.В. Особенности усталостных процессов морских нефтегазовых сооружений // Техника и технология. - 2012. - № 6. - С. 40-41.
8. Староконь И.В. и др. К вопросу об обеспечении безопасной добычи нефти и газа на морских и шельфовых месторождениях // Техника и технология. – 2011. - № 4. - С. 96-99.
9. Староконь И.В. Усталостная долговечность восстановленных тавровых сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. - № 7. - С. 51-56.

Рецензенты:

Бородавкин П.П., д.т.н., проф., генеральный директор ООО «Интергаз», г. Москва;

Литвин И.Е., д.т.н., проф., директор ООО «СТД-Системы технической диагностики», г. Москва.