

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

ГУБАЙДУЛИН МАРАТ РАФКатович

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Специальность 05.23.01  
"Строительные конструкции, здания и сооружения"

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук.

Челябиск 1993

Работа выполнена на кафедре "Оборудование и технология сварочного производства" Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Н.А. Клыков.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
А.Э. Клячин;  
доктор технических наук, профессор  
Л.А. Шефер.

Ведущая организация - Челябинский завод металлоконструкций  
им. С. Орджоникидзе.

Защита состоится 29 июня 1993 г., в 11 часов, на заседании специализированного совета К 053.13.05 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76, конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 28 мая 1993 г.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим выслать в секретариат ученого совета университета по указанному выше адресу.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

  
Трегулов И. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**А к т у а л ь н о с т ь т е м ы.** Основным направлением в увеличении добычи нефти и газа является освоение континентального шельфа. Промышленное освоение минеральных ресурсов континентального шельфа связано с созданием и длительной эксплуатацией морских стационарных платформ (МСП). Опорный блок МСП представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, изготовленную из труб. Особенность их работы является то, что они находятся в коррозионной среде (морская вода) и подвержены действию не только статических, но и переменных (волна, ветер, течение, работа оборудования и т.п.) нагрузок.

При эксплуатации МСП наблюдаются отказы в основных элементах и сварных соединениях конструкций, приводящие к большим экономическим убыткам, тяжелым экологическим последствиям, а также и человеческим жертвам. Из общего числа аварий МСП 12% случаев приходится на разрушения, вызванные усталостными процессами. Возникновение и развитие усталостных трещин в элементах МСП связано с несовершенством конструкций и методов их расчета.

Для правильной оценки усталостной долговечности с точки зрения современных подходов, необходимо знать расчетные характеристики металла, нагрузки действующие на конструкцию и располагать соответствующим методом расчета показателей несущей способности. Известно, что технологические воздействия на металл при изготовлении конструкций существенно отражаются на его свойствах, а следовательно, и на его расчетных характеристиках. Однако положение таково, что проектировщики при оценке несущей способности используют расчетные характеристики, полученные для металла в исходном состоянии, что оказывает влияние на расхождение расчетных и действительных показателей несущей способности. В то же время факторы, обусловленные технологией изготовления сварных конструкций (дефекты сварки, геометрические параметры швов, остаточные напряжения и др.) оказывают большое влияние на их несущую способность. Наконец в расчетных методах важно правильно отразить эксплуатационные факторы, такие как коррозия, характер нагруженности, её стационарность и др. При оценке усталостной долговечности конструкций МСП по существующим методам, изложенным в отечест-

венных и зарубежных нормах, вышеперечисленные факторы учитываются неполностью. В связи с этим решение проблемы, связанной с учетом эксплуатационных и конструктивно - технологических факторов при расчетной оценке усталостной долговечности элементов МСП, является актуальной задачей.

Диссертация выполнена в соответствии с целевой комплексной научно-технической программой Госстроя СССР О. Ц. 007 "Создание и внедрение технологических процессов и технических средств для поиска, разведки и промышленного освоения нефтяных и газовых месторождений континентального шельфа СССР"

Ц е л ь ю работы являются исследование действительной нагруженности и совершенствование метода расчетной оценки усталостной долговечности с дифференцированным учетом конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов.

Н а у ч н а я н о в и з н а работы состоит: в описании реальной реакции сооружения на волновые и эксплуатационные воздействия; в определении параметров переменного воздействия от работы технологического оборудования платформы, навала судна, посадки вертолета и т.п.; в определении факторов, влияющих на коррозионно-усталостные характеристики материала (асимметрия цикла, частота нагружения, масштабный фактор и т.д.) и получении математического описания их влияния на кривую коррозионной усталости материала; в совершенствовании метода расчета усталостной долговечности конструкций МСП с дифференциальной оценкой конструктивно-технологических факторов при нерегулярном режиме нагружения в условиях агрессивной среды.

П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь работы состоит в предложенном алгоритме расчетной оценки усталостной долговечности МСП, на основе которого можно прогнозировать влияние различных факторов (условий нагружения, остаточных напряжений, изменения свойств металла от технологических операций, коррозионной среды и др.) Разработанный алгоритм позволяет создать конструкцию узлов оптимальной формы, а также проводить регламентацию формы и дефектов сварных соединений и элементов МСП.

Р е а л и з а ц и я и в н е д р е н н е р е з у л ь т а т о в.

1. ВСН 39-3.3.1292.4-91. Ведомственные строительные конструкции стальных морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ / Р.Г.Губайдуллин, М.Р.Губайду-

лин, А.К.Тиньгаев и др. // Мингазпром СССР. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991.

2. РД 39-2.23.1292.3-91. Блоки стальные опорные морских стационарных платформ. Рекомендации по повышению сопротивления усталости сварных соединений конструкций МСП / Р.Г.Губайдулин, М.Р.Губайдулин, А.К.Тиньгаев и др. // Мингазпром СССР. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991.

3. Методика комплексной расчетной оценки несущей способности опорного блока МСП при статических и переменных во времени нагрузках. Внедрена в ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова при разработке технических условий. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции морских стационарных платформ с унифицированными узлами.

4. Методика расчетной оценки усталостной долговечности конструкций МСП. Внедрена в ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова при разработке технических условий на проектирование опорных частей платформ с использованием типовых конструкций.

5. Рекомендации по назначению допустимой величины дефектов сварных соединений МСП. Внедрена в ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова при разработке типовых металлических конструкций опорных частей платформ для глубин моря до 300 м на базе унифицированных узлов.

6. Рекомендации по повышению сопротивления усталостному разрушению конструктивных узлов ледостойких стационарных платформ (ЛСП). Внедрены в ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова при разработке технологии изготовления ЛСП для месторождения "Чайво-1" на северо - восточном шельфе о. Сахалин.

7. Рекомендации по повышению сопротивления усталостному разрушению сварных соединений и узлов конструкций ЛСП. Внедрены в НИПИМорнефтегаз при разработке технологии изготовления металлических конструкций ЛСП для Пельтун - Астохского месторождения на северо - восточном шельфе о. Сахалин.

8. Рекомендации по назначению допусков на смещение кромок в кольцевых сварных стыковых соединениях МСП. Внедрены в ППСО "Шельфпроектстрой" на Бакинском заводе глубоководных оснований при разработке технических условий на отбраковку обечаек перед их сваркой.

9. Результаты исследований использовались в ЦНИИПроек-

стальконструкция им. Мельникова при разработке технологии изготовления металлических конструкций ЛСП для "Луньского" месторождения на северо - восточном шельфе о. Сахалин.

Ю. Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Пшеничникова Е.В. Оценка усталостной долговечности сварных соединений стальных конструкций: Учебное пособие. - Челябинск: ЧГТУ, 1992. - 54 с.

На защиту выносятся:

- метод определения действительной нагруженности МСП и ее описание в виде блока;

- результаты исследований по определению влияния технологических воздействий на сопротивление коррозионной усталости основного металла и сварных соединений;

- методика дифференцированного учета конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов при расчете коррозионно-усталостной долговечности конструкций МСП.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы представлялись:

на Всесоюзной научно-технической конференции "Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий", Магнитогорск, 1991 г.;

на пятой Украинской научно-технической конференции по металлическим конструкциям "Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле", Киев, 1992 г.;

на региональной научно-практической конференции, Волгоград, 1989 г.;

на конференции по морским сооружениям континентального шельфа, Севастополь, 1989 г.;

на шестой научно-технической конференции "Проблемы создания новой техники для освоения шельфа", Горький, 1989 г.;

на научно-технической конференции, Магнитогорск, 1987 г.;

на научно-исследовательском семинаре В/О "Совметаллострой НИИпроект" ЦНИИПроектстальконструкция "Исследование и проектирование металлических конструкций". Москва, 1991 г.;

на ежегодных (1987-1992 гг.) научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Челябинского государственного технического университета.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 16 работ и одно учебное пособие.

Объем диссертации. Диссертационная работа содержит : 114 страниц текста, 77 иллюстраций, 23 таблицы, 86 наименований литературы.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой темы, освещены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются Причины вызывающие аварии МСП. Отмечается, что усталостные разрушения обусловлены несовершенством конструкций и методов их расчета. Для обеспечения заданной долговечности МСП необходимо изучение проблем нагруженности конструкций и усталостных характеристик материала с учетом конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов.

Изучению отдельных факторов, влияющих на коррозионно - усталостную прочность посвящены работы Г.В. Карпенко, В.И. Пожурского, А.В. Рябченкова, Л.А. Супруна, Л.А. Гликмана, Мак-Адама и других ученых. Однако положение таково, что в настоящее время в расчете учитываются лишь некоторые факторы без их взаимной связи. Для марок сталей, применяемых в конструкциях МСП, не определены закономерности проявления масштабного фактора, учета влияния локальной концентрации в основном металле и сварных соединениях, влияния пластического деформирования, асимметрии цикла нагружения, влияния вида напряженного состояния, защитных покрытий и поверхностных обработок. А существующие исследования малочисленны и не охватывают всех факторов.

Исходя из вышеизложенного необходимо исследовать влияние технологии изготовления и условий эксплуатации на несущую способность основного металла и сварных соединений.

При расчете МСП рассматривают два основных типа расчетных условий при статическом расчете - экстремальные, при усталостном - нормальные (эксплуатационные). Основной нагрузкой, действующей на МСП, является волновая, которая может быть описана а виде одиночных волн или в виде спектра. От степени податливости сооружения различают статический и динамический расчеты на волновые воздействия.

В инженерной практике проектирования и расчетов МСП до сих

пор преобладает статический расчет на экстремальные волновые нагрузки от отдельных регулярных волн без учета динамических характеристик сооружения, хотя в работах В.М. Крылова, Д.Д. Лаппо, И.Ш. Халфина, В.Х. Глуховского, И.Н. Давидана и других исследователей разработаны подходы к спектральному описанию волковой нагрузки. В связи с этим далеки от совершенства инженерные методы расчета МСП на нормальные воздействия, для оценки усталостной долговечности элементов конструкции с учетом динамической составляющей нагрузки, при спектральном нагружении и вероятностном подходе к расчету волновых нагрузок.

В настоящее время в расчетах не учитываются и нет методов определения эксплуатационных нагрузок на МСП от работы оборудования, навала судна и т.п. Необходимо определить действительное напряженное состояние элементов МСП от волновой и эксплуатационной нагрузок.

Существующие методы расчета усталостной долговечности МСП не учитывают характер нагруженности конструкции и не позволяют дифференцированно учитывать влияние конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов. Наиболее приемлемым методом для расчета усталостной долговечности при нерегулярном нагружении, является метод В.П. Югаева, в соответствии с которым

$$\lambda = \frac{a_p}{\sum_{i=1}^{m_1} \frac{\sigma_{ai}^{m_1} v_{i\delta}}{\sigma_{RKi}^{m_1} N_{Gi}} + \sum_{i=1}^{m_2} \frac{k \sigma_{ai}^{m_2} v_{i\delta}}{\sigma_{RKi}^{m_2} N_{Gi}}}$$

$(\sigma_{ai} \geq \sigma_{RK})$                        $(\sigma_{ai} < \sigma_{RK})$

где  $\lambda$  - расчетное число блоков нагружения,  $a_p$  - сумма относительных усталостных повреждений,  $\sigma_{RK}$  и  $N_G$  - координаты точки перелома кривой усталости с учетом конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов,  $\sigma_{ai}$  и  $v_{i\delta}$  - амплитуда напряжений и число циклов в блоке напряжений,  $m_1$  и  $m_2$  - коэффициенты описывающие наклон левой и правой ветвей кривой усталости (определяются по значениям ограниченных пределов выносливости, лежащих на левой и правой ветвях кривой усталости и в точке перелома).

Данный метод позволяет учитывать накопление усталостных повреждений. Методика Н.А. Клыкова позволяет учесть влияние сложного напряженного состояния и асимметрии цикла на характерности усталостной кривой.



- для знакопеременного цикла:

$$\sigma_R^1 = \frac{\sqrt{6} \alpha \sigma_{-1k}}{K + M_a (\eta_{1k} + R_{\sigma 0} \eta_{2k}) / (1 - R_{\sigma 0})}$$

- для знакопостоянного цикла растяжения:

$$\sigma_R^1 = \frac{\sqrt{6} \alpha \sigma_{-1k}}{K + (\eta_{1k} M_a + 2 \eta_{3k} R_{\sigma 0} M_{\max}) / (1 - R_{\sigma 0})};$$

- для знакопостоянного цикла сжатия:

$$\sigma_R^1 = \frac{\sqrt{6} \alpha \sigma_{-1k}}{K - (\eta_{2k} M_a + 2 \eta_{4k} R_{\sigma 0} M_{\max}) / (1 - R_{\sigma 0})};$$

где  $\sigma_R^1$  - предел выносливости конструкции с учетом реального напряженного состояния, условий нагружения и свойств материала,  $\sigma_{-1k}$  - предел выносливости при симметричном цикле нагружения с учетом влияния конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов, коэффициенты  $\alpha$ ,  $K$ ,  $R_{\sigma 0}$ ,  $M_{\max}$ ,  $M_a$ ,  $\eta_{1k}$ ,  $\eta_{2k}$ ,  $\eta_{3k}$ ,  $\eta_{4k}$  учитывают влияние сложного напряженного состояния, асимметрии цикла нагружения, свойств материала.

Для расчета по этим зависимостям необходимо знать: амплитуду  $\sigma_{a1}$  и количество циклов  $N_{1\sigma}$  для каждой ступени блока напряжений от волновой и эксплуатационных нагрузок, значения ограниченных пределов выносливости, лежащих на левой, правой ветвях кривой усталости и в точке перелома, с учетом реальных условий нагружения и свойств материала, для чего необходимо разработать методику дифференцированного учета влияния конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов на коррозионно - усталостные характеристики металла и сварных соединений при симметричном цикле нагружения, а также учесть влияние асимметрии цикла нагружения с учетом изменения свойств металла в коррозионной среде.

На основании вышеизложенного были сформулированы следующие задачи исследования:

- определить действительное напряженное состояние элементов МСП;
- разработать методику расчетного построения блока нагруженности;
- исследовать влияние технологии изготовления и условий эксплуатации на несущую способность основного металла и сварных соединений;
- разработать основы методики дифференцированного учета конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов

при расчете коррозионно-усталостной долговечности.

Во второй главе приводится методика расчетного построения блока нагруженности МСП. Для его построения необходимо иметь метод определения величин внешних нагрузок и реакцию сооружения на эти воздействия.

Волновая спектральная нагрузка приводит к системе динамических сил с учетом: переменной и квазистатической составляющей волновой нагрузки, различной доли нагрузки, вносимой волнами разных частот, через обобщенную нагрузку от волн единичной высоты, частот и форм собственных колебаний сооружения, коэффициента динамичности при спектральном нагружении. В конечном виде выражение для определения динамических нагрузок от спектрального волнения заданного направления имеет вид:

$$P_{jd} = \frac{2 M_j x_{ij} K_d^{сп}}{k} \sqrt{\Delta\omega \sum_{l=1}^m S_l \left( \sum_{k=1}^m Q_{lk} x_{ik} \right)^2} \cdot \sum_{j=1} M_j x_{ij}$$

где  $P_{jd}$  - динамическая составляющая нагрузки на  $j$ -м уровне;  $M_j$  - масса сосредоточенная на  $j$ -м уровне;  $x_{ij}$  - координата перемещения  $j$ -й массы по  $i$ -й форме собственных колебаний конструкции;  $K_d^{сп}$  - коэффициент динамичности при спектральном волновом воздействии;  $k$  - количество уровней, в которых сосредоточены массы;  $\Delta\omega$  - шаг суммирования по частоте;  $S_l$  - спектр Крылова;  $m$  - количество частот расчетных волн;  $Q_{lk}$  - обобщенная нагрузка от волн единичной высоты в рассматриваемом спектре частот волн;  $x_{ik}$  - координата формы собственных колебаний на  $k$ -м уровне по  $i$ -й форме.

Для описания реакции сооружения на волновое воздействие предлагается проведение экспериментальных исследований.

Величины эксплуатационных нагрузок ( работа оборудования, посадка вертолета и т. д. ) определяются по нормативным документам или экспериментально, но так как в настоящее время не рассматривается реакция сооружения на эти воздействия, необходимо проведение экспериментальных исследований действительной нагруженности конструкций МСП от волновой и эксплуатационных нагрузок.

Корректируется методика определения предельных амплитуд напряжений с учетом влияния коррозионной среды. Приводятся зависимости, описывающие влияние асимметрии цикла нагружения на

ограниченный предел выносливости с учетом изменения свойств материала во времени под действием коррозионной среды (рис. 1), и зависимости для расчета допустимых амплитуд напряжений при отнулевом цикле растяжения и сжатия:

$$\sigma_{\text{оак}} = \sigma_{-1\text{к}} - (\sigma_{-1\text{к}})^2 / (\sigma_{\text{сг}} + \sigma_{-1\text{к}}) \approx 0.5 \sigma_{\text{Т}};$$

$$\sigma_{\text{оа сжк}} = -(\sigma_{-1\text{к}})^2 / (\sigma_{\text{сг}} - \sigma_{-1\text{к}}) \approx -0.45 \sigma_{\text{Т}},$$

где  $\sigma_{\text{оак}}$  - предел выносливости при отнулевом цикле растяжения;  $\sigma_{-1\text{к}}$  - предел выносливости при симметричном нагружении;  $\sigma_{\text{сг}}$  - предел трещиностойкости стали с учетом коррозионного износа во времени;  $\sigma_{\text{Т}}$  - предел текучести;  $\sigma_{\text{оа сжк}}$  - предел выносливости при отнулевом цикле сжатия.

Предлагается методика описывающая влияние факторов на параметры кривой усталости через изменение ограниченных пределов выносливости на базах  $10^6$ ,  $2 \times 10^7$ ,  $10^8$  циклов (рис. 2). Описывается методика, связывающая параметры кривой усталости для стандартных образцов в воздушной среде и морской воде.

Обосновывается необходимость проведения коррозионно - усталостных испытаний основного металла и сварных соединений конструкций МСП для определения численных значений коэффициентов и функций, описывающих совместное влияние конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов.

Третья глава посвящена экспериментальному определению действительной нагруженности конструкции МСП. Для проведения экспериментов была разработана и апробирована оригинальная технология наклейки, коммутации и герметизации датчиков, позволяющая вести раздельную запись напряжений от нормальной силы, крутящего и изгибающих моментов в трубчатых элементах.

В течение года проводилась регистрация напряженного состояния узла (основной трубы и четырех патрубков) действующей МСП, установленной на шельфе Каспийского моря. Сняхронно с записью изменения напряженного состояния элементов МСП отмечались высота и направление волн, скорость и направление ветра.

После расшифровки записей получены распределения амплитуд и периодов напряжений: от работы оборудования платформы, от бурения, от подъема и спуска буровой колонны, от посадки и взлета вертолета, от навала судна, от волн различных высот и направлений.

На основе наблюдений определено время воздействия эксплуа-



тационных нагрузок в течение года для периодов освоения и эксплуатации платформы. За время наблюдений установлена также реакция сооружения на различные виды нагрузок.

Установлено, что период колебаний платформы не совпадает с периодом волновой нагрузки и соответствует собственной частоте колебания конструкции, в результате наблюдается так называемое "биение", то есть изменение амплитуды колебаний платформы, которое может быть описано зависимостью

$$\sigma = \pm 2 \sigma_{\max} \sin((\omega - \varphi) t / 2),$$

где  $\sigma_{\max}$  - амплитуда напряжений от волновой нагрузки;  $\omega$  - частота собственных колебаний конструкции;  $\varphi$  - средняя частота волновой нагрузки.

Затухание амплитуд напряжений от ударной нагрузки при навале судна, описывается следующей зависимостью

$$\sigma_{a p} = \sigma_{a \max} \exp^{-\delta p},$$

где  $\sigma_{a p}$  - значение амплитуды нагрузки в  $p$ -м цикле колебаний;  $\sigma_{a \max}$  - максимальное значение нагрузки;  $\delta$  - логарифмический декремент колебаний;  $p$  - номер цикла.

Гармоническая нагрузка от работы оборудования, бурения, взлета и посадки вертолета описывается следующей зависимостью

$$P = K P_{\max} \sin(\theta t - \epsilon),$$

где  $K$  может быть определено по формуле

$$K = 1 / \sqrt{(1 - \theta^2 / \omega^2)^2 + (\delta / \pi)^2 \theta^2 / \omega^2},$$

где  $\theta$  - частота вращения неуравновешенной массы;  $\omega$  - частота собственных колебаний конструкции;  $\delta$  - логарифмический декремент колебаний;  $\epsilon$  - сдвиг фазы вынужденных колебаний конструкции по отношению к колебаниям вынуждающей силы.

Получены описание волнового режима на месторождении им. 28 Апреля в Каспийском море и экспериментальный блок главных напряжений в элементах узла МСП.

В результате исследований определены необходимые данные о реакции сооружения на волновые и эксплуатационные нагрузки для описания действительного напряженного состояния элементов и определения их нагруженности в виде блока амплитуд напряжений и циклов нагрузки.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию характеристик сопротивления коррозионной усталости основного металла и сварных соединений элементов МСП. Испытания проводили как на стандартных цилиндрических об-

разцах, так и на полномасштабных образцах, вырезанных из реальных элементов и сварных соединений конструкций МСП, после прохождения металлом отдельных технологических операций.

Исследовано влияние на параметры коррозионно - усталостных кривых основного металла и сварных соединений: пластического деформирования, концентрации напряжений, масштабного фактора, остаточных напряжений, дефектов сварки. Изучено влияние защитных покрытий (эпоксидного покрытия и алюминирования)

Экспериментально замерен уровень остаточных напряжений в сварных соединениях и металле конструкции МСП. Уровень остаточных напряжений в сварных соединениях узлов, прошедших высокий отпуск, составляет 160 МПа, в остальных - предел текучести.

Проведена экспериментальная проверка методики вычисления коэффициента  $\alpha_p$ , предложенная В.П. Когаевым для нерегулярного нагружения; получена хорошая сходимость результатов.

В результате обработки экспериментальных данных определены зависимости описывающие влияние каждого из факторов на ограниченные пределы выносливости на базах  $10^6$ ,  $2 \times 10^7$ ,  $10^8$  циклов.

Методом планирования эксперимента обработана 21 кривая усталости и получены зависимости, учитывающие совместное влияние масштабного фактора (параметр X1), концентрации напряжений (параметр X2), частоты нагружения (параметр X3), величины пластического деформирования (параметр X4), наличия сварного соединения (параметр X5) на ограниченные пределы выносливости на базах  $10^6$ ,  $2 \times 10^7$ ,  $10^8$  циклов.

$$X1 = (\delta - 10) / 20 - 1, \quad \delta = 10 \dots 50 \text{ мм,}$$

где  $\delta$  - толщина элемента.

$$X2 = (\alpha_\sigma - 1) / 1.75 - 1, \quad \alpha_\sigma = 1 \dots 4.5,$$

где  $\alpha_\sigma$  - теоретический коэффициент концентрации напряжений.

$$X3 = \lg \nu / 1.59 - 1, \quad \nu = 1 \dots 1500 \text{ цикл/мин,}$$

где  $\nu$  - частота приложения нагрузки.

$$X4 = \epsilon / 3.5 - 1, \quad \epsilon = 0 \dots 3.5 \%,$$

где  $\epsilon$  - удлинение крайнего волокна.

X5 = 1 при наличии сварного соединения, для основного металла X5 = -1.

Совместное влияние факторов.

Для базы  $10^6$  циклов:

$$U1 = 0.29 - 0.22 X1 - 0.41 X2 + 0.14 X3 - 0.04 X4 -$$

$$- 0.05 X_5 + 0.06 X_1^2 - 0.26 X_1 X_2;$$

$$\sigma_{-1к} = Y_1 \sigma_{-1к}^0,$$

Для базы  $2 \times 10^7$  циклов:

$$Y_2 = 0.37 - 0.3 X_1 - 0.48 X_2 + 0.19 X_3 - 0.12 X_4 + \\ + 0.1 X_5 - 0.04 X_1^2 - 0.27 X_1 X_2;$$

$$\sigma_{-1к} = Y_2 \sigma_{-1к}^0,$$

Для базы  $10^8$  циклов:

$$Y_3 = 0.65 - 0.4 X_1 - 0.5 X_2 + 0.14 X_3 + 0.08 X_4 + \\ + 0.08 X_5 - 0.25 X_1^2 - 0.16 X_1 X_2;$$

$$\sigma_{-1к} = Y_3 \sigma_{-1к}^0,$$

На основе проведенных исследований получены необходимые данные о влиянии конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов на характеристики кривой усталости и определены зависимости позволяющие вести их дифференцированный учет.

В пятой главе приведен алгоритм расчета усталостной долговечности конструкций МСП с учетом действительной нагруженности и дифференцированным учетом конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов.

В шестой главе приведен пример расчета усталостной долговечности узла МСП.

## ВЫВОДЫ

1. В существующих методах оценки усталостной долговечности конструкций МСП недостаточно полно учитываются факторы действительной нагруженности расчетных сечений, обусловленных технологией изготовления сварных конструкций и коррозионным воздействием морской воды.

2. Изучено влияние на усталостные характеристики элементов МСП конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Установлено, что масштабный фактор незначительно изменяет предел выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов (от 70 до 90 МПа).

3. Остаточные напряжения, вызванные сваркой и другими технологическими операциями, достигают в элементах предела текучести даже после высокого отпуска при температуре  $650^\circ \text{C}$ , уровень остаточных напряжений составляет 100...160 МПа. Наличие остаточных напряжений в сварном соединении снижает ограниченный предел выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов с 80 до 60 МПа.

4. Геометрическая неоднородность сварного соединения может

создавать концентрацию напряжений от 1 до 5, что приводит к снижению предела выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов от 70 до 35 МПа.

5. Пластическое деформирование при гибке и правке, дающее удлинение крайнего волокна до 3.5 %, практически не сказывается на ограниченном пределе выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов.

6. При изменении частоты нагружения от 1500 до 1 цикла в минуту ограниченный предел выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов снижается с 80 до 48 МПа.

7. Влияние морской воды снижает ограниченный предел выносливости на базе  $2 \times 10^7$  циклов в 2...5 раз.

8. Разработан метод расчетного построения блока нагруженности МСП с учетом:

- спектрального приложения волновой нагрузки;
- передаточной функции обобщенной нагрузки от волн единичной высоты;
- частот и форм собственных колебаний;
- коэффициента динамичности для спектрального нагружения.

9. Экспериментально изучена реальная нагруженность одного из узлов МСП от волновой и эксплуатационной нагрузок (работа технологического оборудования, навал судна, взлет и посадка вертолета и т.п.). Установлено, что переменные напряжения достигают 70 МПа и соответствуют расчетным напряжениям, полученным в данной работе. Определено время их воздействия. Неучет эксплуатационной нагрузки, имеющей небольшую амплитуду напряжений, но высокую частоту и длительное время воздействия, может приводить к снижению долговечности до 30 %. Получены расчетные зависимости описывающие реакцию сооружения на эксплуатационные нагрузки.

10. На основе обобщения современных достижений в области усталостной прочности и результатов исследований, полученных нами, разработана методика, позволяющая дифференцированно учитывать влияние условий нагружения, конструктивно - технологических и эксплуатационных факторов на коррозионно - усталостную долговечность МСП.

11. Разработан алгоритм, позволяющий оценить коррозионно - усталостную долговечность элементов МСП с дифференцированным учетом конструктивно - технологических и эксплуатационных фак-



торов.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в работах:

- ВСН 39-3.3.1292.4-91. Ведомственные строительные конструкции стальных морских стационарных платформ. Правила производства и приемки работ / Р.Г.Губайдулин, М.Р.Губайдулин, А.К.Тиньгаев и др. // Мингазпром СССР. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991. -

РД 39-2.23.1292.3-91. Блоки стальные опорные морских стационарных платформ. Рекомендации по повышению сопротивления усталости сварных соединений конструкций МСП / Р.Г.Губайдулин, М.Р.Губайдулин, А.К.Тиньгаев и др. // Мингазпром СССР. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991.

- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Пшеничникова Е.В. Оценка усталостной долговечности сварных соединений стальных конструкций. - Челябинск: ЧГТУ, 1992. - 54 с.

- Влияние технологических и конструктивных факторов на несущую способность сварных соединений морских стационарных платформ / Р.Г. Губайдулин, М.Р. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, Е.В. Пшеничникова // Технология судостроения. - 1990. - № 9. - С. 79-84.

- Технология и технико - экономические показатели различных конструктивных решений ледостойких стационарных платформ / Р.Г. Губайдулин, М.Р. Губайдулин, А.К. Тиньгаев, Е.В. Пшеничникова // Технология судостроения. - 1990. - № 9. - С. 53-56.

- Оценка влияния смещения кромок в кольцевых стыковых соединениях на прочность конструкций морских стационарных платформ / Н.А.Кликов, Р.Г.Губайдулин, М.Р.Губайдулин и др. // Судостроение. - 1991. - № 8. - С. 32-36.

- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р. Оценка усталостной долговечности элементов и сварных соединений конструкций морских стационарных платформ // Сб. научн. трудов СИЦ - Морнефтегаз. - Рига: СИЦ, 1991. - С. 23-25.

- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р. Оценка усталостной долговечности конструкций морских стационарных платформ // Межгосударственный сборник научных трудов. - Киев: КИСИ, 1992. - С. 3-16.

- Губайдулин М.Р., Израйлов А.А. Влияние нестационарного нагружения на долговечность морских стационарных платформ //

Металлические и пластмассовые конструкции: Сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1990. - С. 42-48.

- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р. Определение расчетной нагруженности морских стационарных платформ // Вопросы сварочного производства: Сб. науч. трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1992. - С. 22-26.

- Губайдулин М.Р., Губайдулин Р.Г. Оценка усталостной долговечности сварных соединений морских стационарных платформ с учетом влияния технологических операций в условиях коррозионной среды // Всесоюзная научно-техническая конференция "Испытания строительных металлических конструкций в условиях действующих предприятий": Тез. докл. - Магнитогорск: МГМИ, 1991. - С. 23-25.

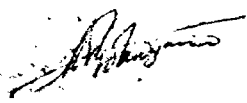
- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р. Определение долговечности сварных соединений конструкций морских стационарных платформ // Пятая украинская научно-техническая конференция по металлическим конструкциям "Усиление и реконструкция производственных зданий и сооружений, построенных в металле": Тез. докл. - Киев: КИСИ, 1992. - С. 41-43.

- Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Тиньгаев А.К. Влияние технологических операций на сопротивление усталостному разрушению сталей 09Г2СШ и 12ХГДАФ // Региональная научно-практическая конференция: Тез. докл. - Волгоград: ВПИ, 1988. - С. 157-158.

- Влияние технологических и конструктивных факторов на несущую способность сварных соединений морских стационарных платформ / Н.А. Клыков, Р.Г. Губайдулин, М.Р. Губайдулин и др. // Конференция по морским сооружениям континентального шельфа: Тез. докл. - Севастополь, 1989. - С. 72-74.

- Губайдулин М.Р. Влияние технологических и конструктивных факторов на несущую способность морских стационарных платформ // Шестая научно-техническая конференция "Проблемы создания новой техники для освоения шельфа": Тез. докл. - Горький: ГПИ, 1989. - С. 83-85.

- Губайдулин М.Р., Тиньгаев А.К. Влияние технологических операций на сопротивление усталостному разрушению сталей 09Г2СШ и 12ХГДАФ // Научно-техническая конференция: Тез. докл. - Магнитогорск: МГМИ, 1987. - С. 28-29.



Техн. редактор А.В.Миних

Издательство при Челябинском  
государственном техническом университете

---

Подписано в печати 25.05.93. Формат 60X90 1/16. Печ. л. 1.  
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 122/291.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр.им. В.И.Ленина,76.