

На правах рукописи



ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ
СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИН С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и
детали машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Соколов Сергей Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты **Гордиенко Валерий Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
профессор кафедры «Наземные, транспортно-технологические машины»

Фрумен Александр Исаакович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», профессор
кафедры «Строительная механика корабля»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени академика И.В. Горынина»

Защита состоится: 14.06.2016 в 14:00 на заседании совета Д.212.229.12 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>

Автореферат разослан «2» апреля 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д.212.229.12, к.т.н., профессор

А. Н. Евграфов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена совершенствованию методов расчета на прочность металлических конструкций машин (грузоподъемных кранов, экскаваторов, погрузчиков, трейлеров и пр.), эксплуатируемых в условиях низких климатических температур. Актуальность работы для отечественного машиностроения обусловлена расширением хозяйственной деятельности в северных районах России. В указанных районах минимальные температуры в зимний период могут достигать отметок минус 40, минус 60°С и ниже. Как следствие стальные сварные конструкции машин и оборудования, предназначенных для эксплуатации на открытом воздухе должны проектироваться с учетом возможности возникновения хрупкого разрушения. Особая опасность хрупкого разрушения связана с тем, что оно в большинстве случаев сопровождается потерей несущей способности детали или конструкции.

Дополнительным фактором актуальности данной проблемы является противоречие, возникшее между современными методами анализа напряженного состояния конструкций с помощью метода конечных элементов и традиционным условием прочности, сформулированным в номинальных напряжениях. Метод конечных элементов в отличие от классических методов сопротивления материалов дает более полную картину напряженного состояния с учетом местных напряжений в зонах геометрической концентрации и локального приложения нагрузок. Опыт эксплуатации конструкций показал, что в условиях положительных температур эти особенности действительно можно игнорировать в прочностных расчетах. Однако при работе конструкции при низких температурах места концентрации напряжений могут стать очагом хрупкого разрушения.

Объект исследования. Прочность сварных стальных конструкций машин в условиях низких климатических температур.

Предмет исследования. Методы прогнозирования прочности сварных стальных конструкций машин в условиях низких климатических температур.

Целью работы является методика расчета сварных стальных конструкций машин на прочность с учетом низких климатических температур.

Научная новизна работы:

1. Диаграмма разрушения элемента стальной конструкции с концентратором напряжений, отражающая влияние характера напряженно-деформированного состояния и условий нагружения, а также результаты анализа ее параметров для типичных конструктивных концентраторов.

2. Методика экспериментально-расчетного определения параметров диаграммы разрушения сварных узлов стальных конструкций машин с учетом комплексного воздействия конструктивно-технологических факторов и температуры.

3. Результаты экспериментально-расчетного исследования параметров диаграммы разрушения сварных узлов из конструкционных сталей, подтвердившие адекватность предложенной диаграммы разрушения.

4. Результаты конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния узлов сварных стальных конструкций машин, содержащие оценки параметров концентрации напряжений, необходимые для прогнозирования их прочности при низкой температуре.

Практическая ценность работы:

1. Инженерная методика расчета сварных стальных конструкций машин и оборудования на прочность, учитывающая их конструктивно-технологические характеристики и низкие климатические температуры эксплуатации.

2. Методика приближенной оценки местных пластических деформаций в узлах стальных конструкций машин на основе результатов линейного конечно-элементного анализа.

Достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, подтверждена натурными и численными экспериментами, корректным использованием методов математического анализа и аналитической механики.

Апробация работы:

Результаты исследований докладывались на международных научно-практических и научно-технических конференциях. Имеются акт о внедрении результатов диссертационной работы и справка об использовании результатов диссертационной работы.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 4 работы в научных журналах и сборниках трудов Международных и Российских конференций и семинаров, в том числе 2 статьи в реферируемых изданиях из перечня ВАК РФ.

Объем и структура диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 100 наименований. Объем диссертации составляет 120 страниц, включая 46 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проведен анализ исследовательских и нормативных материалов, посвященных прогнозированию прочности деталей и конструкций в условиях нормальных и низких температур.

Многочисленные эксперименты, проводившиеся на образцах с геометрическими и сварочными концентраторами, позволили выявить основные факторы, оказывающие влияние на возникновение хрупких разрушений. Таковыми являются: низкая температура, высокая скорость деформирования, наличие концентраторов напряжений, объемность напряженного состояния, остаточные сварочные напряжения. Результат воздействия этих факторов, то есть, приведут ли они к хрупкому разрушению элемента конструкции или пластической деформации при экстремальном нагружении, зависит от свойств материала элемента, его химического состава и структуры. Установлено, что хрупкое разрушение практически всегда возникает в результате совместного влияния нескольких из указанных факторов.

Нормативные методы защиты конструкций от хрупкого разрушения базируются на результатах испытания образцов основного металла на ударный изгиб и не учитывают конструктивно-технологических особенностей сварной конструкции.

Современные теоретические подходы к прогнозированию характера разрушений деталей и элементов конструкций машин базируются на результатах работ А. Ф. Иоффе, Н.И. Давиденкова, Б.Я. Фридмана, А. Стро, А. Котрелла, Д. Ирвина, В.В.Москвитина, Л.А. Копельмана, Н. А. Махутова, А.В. Ильина, Б.З. Марголина и других авторов. Анализ указанных подходов показал, что ни один из них не дает методики, позволяющей предсказывать на стадии проектирования поведение сварного узла стальной конструкции машины, эксплуатируемой в условиях низких климатических температур, без обширных дополнительных экспериментальных исследований.

Результаты обзора позволили сформулировать основную задачу данной работы как создание методики расчета сварных стальных конструкций на прочность с учетом низких климатических температур, пригодной для инженерного использования.

Глава 2 посвящена разработке диаграммы деформирования и разрушения элемента сварной конструкции. В основе диаграммы лежат положения обобщенной теорией хрупкого разрушения, предложенной Л.А. Копельманом: хрупкое разрушение возникает в случае, когда в области концентрации напряжений последовательно выполняются два условия

$$\sigma_1 \geq S_0, \quad \sigma_e \geq \sigma_T, \quad (1)$$

где σ_e – эквивалентное напряжение по теории Мизеса; σ_T – предел текучести стали; σ_1 - первое главное нормальное напряжение; S_0 – сопротивление отрыву. Если выполняется только второе из этих условий, то начинаются пластические деформации. За условие вязкого разрушения принимается деформационное условие прочности

$$\varepsilon_p \geq \varepsilon_{pc},$$

где ε_p - интенсивность пластической деформации; ε_{pc} - предельное значение интенсивности пластической деформации. Оно вычисляется по методике Н. А. Махутова, как $\varepsilon_{pc} = \varepsilon_{pc1} D_e$, где ε_{pc1} - максимальное значение предельной пластической деформации при одноосном растяжении цилиндрического образца; D_e - коэффициент снижения предельной пластической деформации.

В качестве характеристики объемности напряженного состояния используется коэффициент жесткости напряженного состояния, определяемый как $\eta = \sigma_1 / \sigma_e$. Он зависит от размеров и формы концентратора напряжений.

Модель процессов, происходящих в элементе конструкции при нагружении, представлена в виде пространственной диаграммы, построенной в координатах $\sigma_1 - \eta - \varepsilon_p$ (рисунок 1).

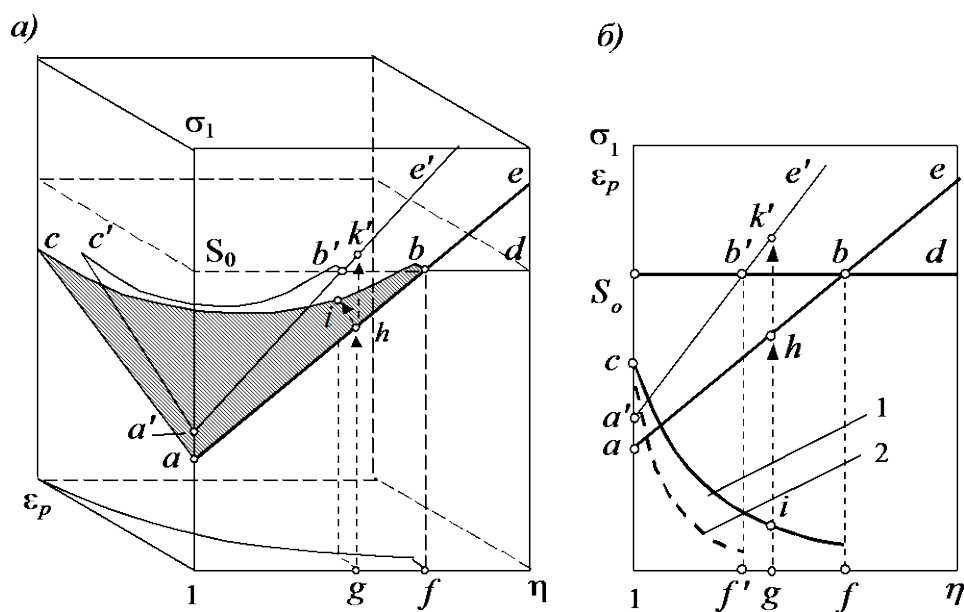


Рисунок 1 – Диаграмма разрушения в координатах $\eta - \sigma_1 - \varepsilon_p$ (а), ее пересечение с плоскостью $\sigma_1 \eta$ и проекция на плоскость $\varepsilon_p \eta$ (б)

Линия ae на плоскость $\sigma_1 \eta$ (рисунок 1, а, б) показывает зависимость значения первого главного напряжения в момент начала текучести в вершине концентратора при температуре 20°C от коэффициента жесткости $\sigma_{1T} = \eta \sigma_T$. Оно соответствует выполнению первого из условий (1). Уровень bd соответствует

значению сопротивления отрыву S_0 . Поверхность abc описывает процесс пластического деформирования материала в вершине концентратора. Линия cb представляет собой кривую предельных деформаций.

При нагружении элемента конструкции с концентратором, для которого $\eta < f$, первым будет выполнено второе условие и начнется пластическая деформация. При этом предельные пластические деформации в этой области с увеличением η существенно уменьшаются. Соответственно снижается запас пластичности элемента конструкции. Если же $\eta \geq f$, то сначала будет выполнено условие $\sigma_1 \geq S_0$, при дальнейшем возрастании нагрузки – условие $\sigma_e \geq \sigma_r$, и далее произойдет хрупкое разрушение.

При низких температурах значение предела текучести возрастает, и процесс пластического деформирования материала будет описываться поверхностью $a'b'c'$ (рисунок 1, а), а первое главное напряжение, соответствующее пределу текучести, – линией $a'e'$. Сопротивление отрыву S_0 останется на том же уровне, так как не зависит от температуры. Это приведет к тому, что хрупкие разрушения будут происходить при значениях $\eta < f$.

Данная диаграмма может быть использована для оценки вида разрушения (вязкого или хрупкого) в элементе конструкции с известным коэффициентом жесткости напряженного состояния. На диаграмме вязко-хрупкий переход характеризуется положением точки b .

Диаграмма разрушения описывает только состояние материала в вершине концентратора. Как будет развиваться процесс деформирования дальше, остановится трещина или пройдет через все сечение, зависит от свойств материала, размеров, конфигурации и условий нагружения всего элемента конструкции. Однако даже если надрыв будет локальным, это снизит усталостную и коррозионную долговечность конструкции и, следовательно, такое состояние недопустимо для режима нормальной эксплуатации.

Параметры диаграммы деформирования могут быть получены из совместной обработки результатов испытаний образцов с концентратором и чис-

ленного анализа их напряженно-деформированного состояния. Пример такой обработки применительно к образцам с геометрическим концентратором приведен в диссертации.

Также в главе 2 был выполнен анализ зависимости коэффициента снижения предельной пластической деформации D_e от коэффициента жесткости напряженного состояния с помощью аналитических методов и метода конечных элементов. Было установлено, что для распространенных элементов стальных конструкций машин коэффициент снижения предельной пластической деформации может быть описан с помощью выражения $D_e = \frac{k_D}{3\eta - 2}$, при этом значения коэффициента жесткости напряженного состояния в сварных соединениях без непроваров лежат в интервале от 1,2 до 1,4. В зоне концентрации напряжений у непровара коэффициент жесткости имеет значения от 1,8 до 2,1.

Для описания графика зависимости предельной пластической деформации в концентраторе ε_{pc} при температуре испытаний T от жесткости напряженного состояния η предложена зависимость

$$\varepsilon_{pc}(\eta, T) = \frac{\varepsilon_{pc1} k_D}{(3\eta - 2)^{u(T)}}. \quad (2)$$

Значение показателя степени в ней должно быть получено в результате экспериментально-расчетного исследования разрушения сварных образцов, методика которого представлена в главе 3.

Глава 3 посвящена разработке методики экспериментально-расчетного определения параметров диаграммы разрушения для сварных узлов.

Данная методика включает:

- а) конструкцию образца, в котором реализуется весь комплекс сварочных факторов;
- б) методику испытания образца;
- в) методику анализа напряженно-деформированного состояния образца;
- г) методику построения зависимости $\varepsilon_{pc}(\eta, T)$ (2) по результатам испыта-

ний и расчета.

Предложена технологичная конструкция сварного образца (рисунок 2), в которой реализуется комбинация факторов, влияющих на возникновение хрупкого разрушения: концентрация напряжений, обеспечивающая значение $\eta = 1,5 \div 2,1$ в зависимости от размера зазора a , и металлургические особенности сварного соединения.

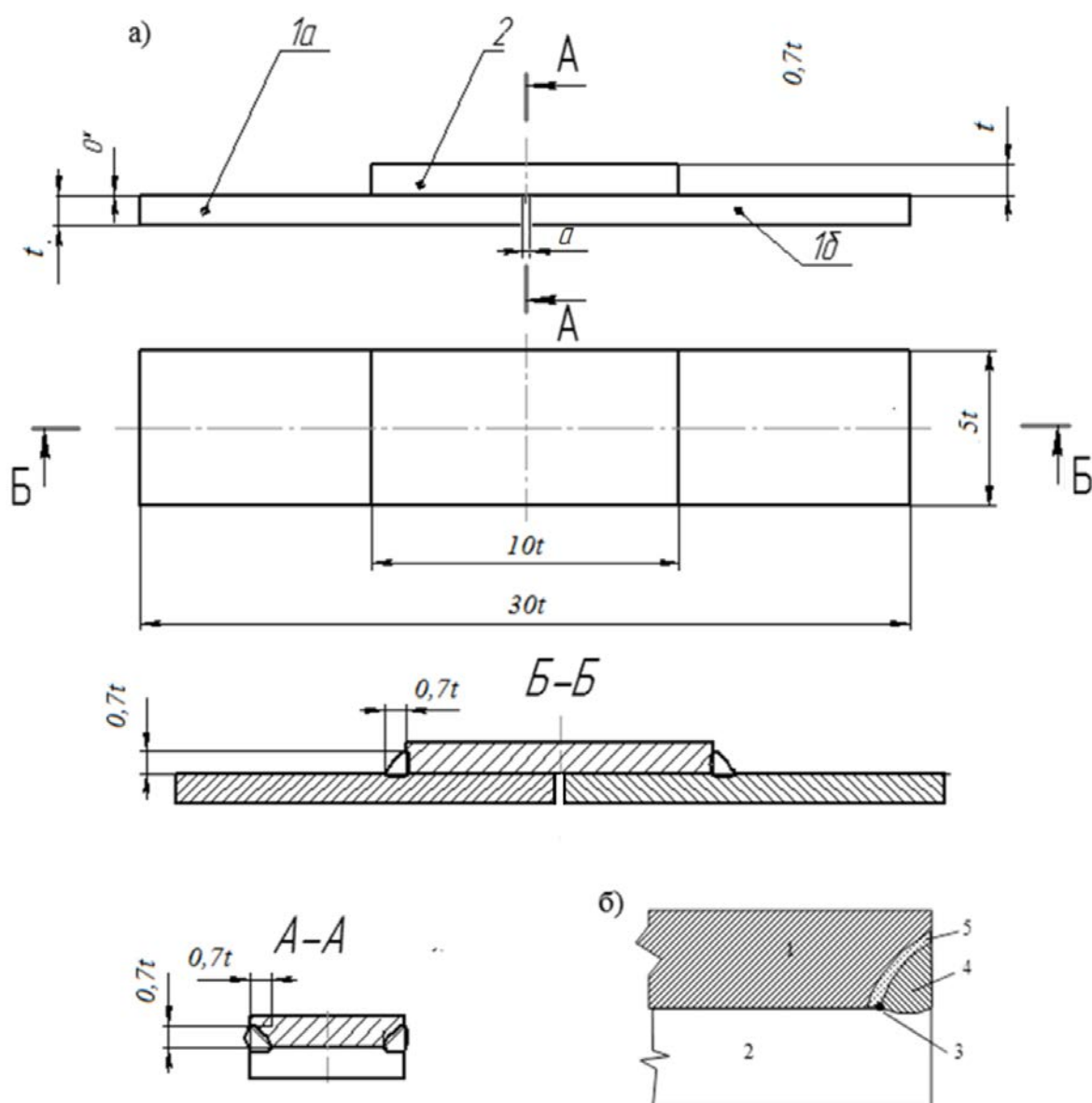
Испытания сварных образцов на разрыв производятся в условиях нормальных и низких климатических температур. Охлаждение осуществляется в среде смеси спирта с жидким азотом. Процесс охлаждения и контроль температуры должен обеспечить равномерное распределение температуры по толщине испытываемой пластины. Рекомендуемая скорость нагружения должна быть не ниже, чем скорость нагружения реальных конструкций рассматриваемого типа. В результате испытания сварного образца на разрыв необходимо получить диаграмму растяжения в координатах «удлинение образца – усилие растяжения».

Интенсивность пластической деформации и механические напряжения в зоне концентрации вычисляются с помощью моделирования процесса нагружения образца методом конечных элементов. Исходными данными для расчета являются геометрические параметры образца, перемещения захватов в процессе испытаний и механические характеристики материала при температуре испытаний. Для описания процесса разрушения параметры напряженно-деформированного состояния образца усредняются по объему структурного элемента. Размер структурного элемента определяется по методике Н.Ф. Морозова и для конструкционных сталей составляет $d = 3..7$ мм. В данной работе принято $d = 5$ мм.

В результате испытаний и конечно-элементного расчета находятся значения η и расчетной пластической деформации структурного элемента ε_{pc} на момент разрушения. Эти данные позволяют определить показатель степени в выражении $\varepsilon_{pc}(\eta, T)$ (2).

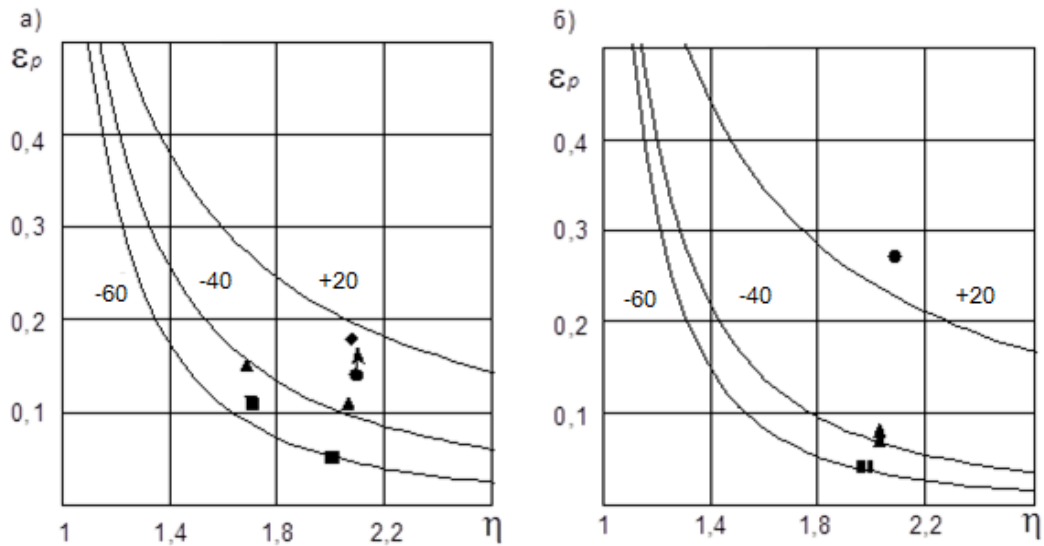
Для реализации предложенной методики экспериментально-расчетного

определения параметров диаграммы разрушения сварных узлов были проведены испытания 11 образцов, изготовленных из сталей Ст3 и 09Г2С. Результаты испытаний смоделированы методом конечных элементов. Получены кривые предельных деформаций для температур: +20 °С; -40 °С; -60 °С для образцов, изготовленных из сталей Ст3пс и 09Г2С (рисунок 3, а и рисунок 3,б соответственно).



а) чертеж образца; б) схема распределения зон в образце: 1 и 2 – основной металл пластин; 3 – точка максимальной концентрации напряжений; 4 – наплавленный металл; 5 – зона термического влияния.

Рисунок 2 – Образец для испытаний



Экспериментальные точки получены при температуре испытаний +20 (●),
-20 (◆), -40 (▲), -65 °С (■).

Рисунок 3 – Зависимость предельных пластических деформаций от коэффициента жесткости напряженного состояния

В главе 4 предложена методика приближенной оценки местных пластических деформаций в узлах металлических конструкций машин, на основе результатов линейного конечно-элементного анализа.

В области малых пластических деформаций местные пластические деформации описываются формулой Нейбера, которая связывает теоретический коэффициент концентрации напряжений с коэффициентами концентрации напряжений и деформаций в упруго-пластической зоне концентратора.

С учетом поправочного коэффициента формула записывается как

$$K_\sigma K_e = \xi \alpha_\sigma^2, \quad (3)$$

где $K_\sigma = \frac{\sigma_{e(pl), \max}}{\sigma_n}$ – коэффициент концентрации напряжений в упруго-пластической области; $\sigma_{e(pl), \max}$ – максимальные эквивалентные напряжения по теории фон Мизеса в зоне концентрации напряжений при упруго-пластическом деформировании; σ_n – номинальное эквивалентное напряжение по теории фон

Мизеса в элементе конструкции; $K_e = \frac{e_{i,\max}}{e_n}$ – коэффициент концентрации деформаций; $e_{i,\max}$ – максимальное значение интенсивности деформаций в концентраторе при упруго-пластическом деформировании; e_n – номинальное значения интенсивности деформаций в элементе; $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{e(e),\max}}{\sigma_n}$ – теоретический коэффициенты концентрации напряжений при упругом состоянии материала; $\sigma_{e(e),\max}$ – максимальные эквивалентные напряжения по теории фон Мизеса в концентраторе при абсолютно упругом состоянии материала; ξ – коэффициент локальных деформаций.

После преобразования формулы (3) было получено выражение для оценочного расчета интенсивности пластических деформаций в зоне концентрации напряжений:

$$e_{i,pl} = \frac{\xi \sigma_{e(e),\max}^2}{E \eta \sigma_T} - \frac{\sigma_T}{E}. \quad (4)$$

Для определения коэффициента локальных пластических деформаций ξ и проверки адекватности выражения (4) выполнено исследование напряженно-деформированного состояния серии типовых сварных узлов стальных конструкций машин. Были проанализированы модели с высокой степенью детализации, построенные из 3D-элементов, и соответствующие им инженерные модели, построенные из 2D-элементов. Пример таких моделей для фланцевого соединения приведен на рисунке 4.

Анализ показал, что выражение (4) позволяет определять местные пластические деформации с относительной погрешностью не более 10%, если номинальные напряжения в сечении не превышают 80% предела текучести. В сварных узлах, где пластическая деформация не распространяется на всю толщину листов, следует считать $\xi = 1,2$. В узлах, где пластическая деформация может распространяться на всю толщину листов следует считать $\xi = 1,4$.

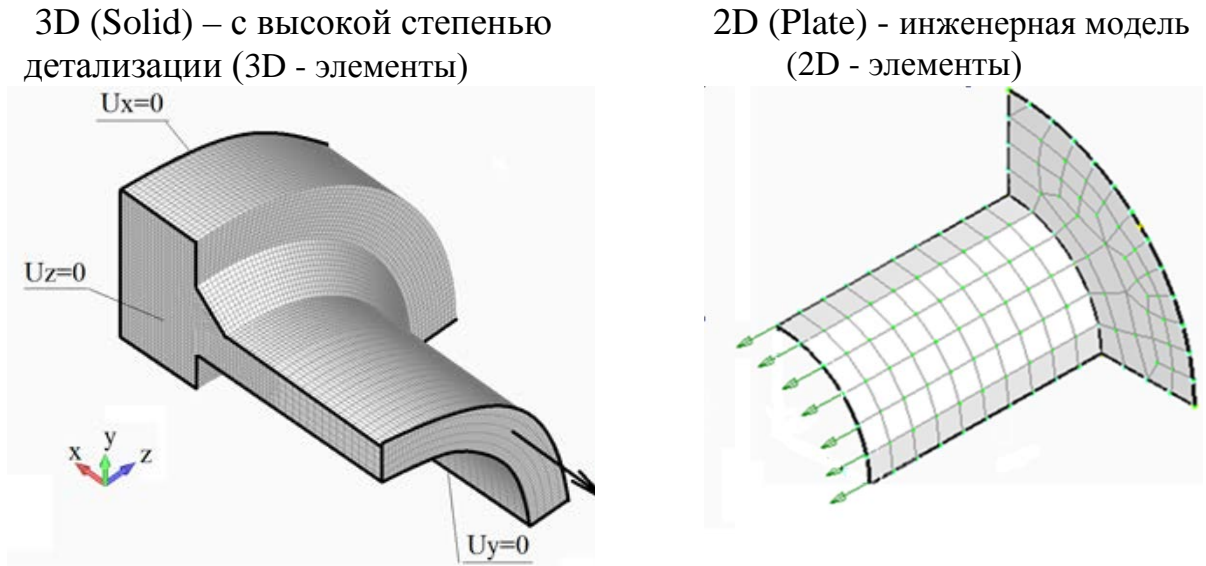


Рисунок 4 - Модель сварного фланцевого соединения

В главе 5 предложена инженерная методика расчета стальных конструкций машин на прочность, учитывающая их конструктивно-технологические характеристики и низкие климатические температуры эксплуатации. Методика основана на использовании локальных характеристик напряженно-деформированного состояния конструкции. Она включает:

- механические испытания цилиндрических образцов по ГОСТ 1497;
- испытания крупногабаритных образцов с $a = 0$ и $a = 0,1t$ (рисунок 2) при минимальной допускаемой температуре эксплуатации изделия;
- построение кривых предельных деформаций (2);
- расчет стальной конструкции машины и определение характеристик напряженно-деформированного состояния в её узлах;
- проверка прочности элемента конструкции, которая выполняется по условию

$$e_{pl} \leq [e_{pl}] = \frac{e_{pl}(\eta, T)}{[n]} \quad (5)$$

Выполнение условия (5) означает, что конструкция будет способна воспринимать максимальные эксплуатационные нагрузки без возникновения разрушения в зоне концентрации напряжений, если:

- минимальная температура эксплуатации не ниже той, при которой были выполнены испытания образцов;

- элементы конструкции изготовлены по той же технологии сварки, что и сварные образцы и имеют не большие толщины, чем элементы образца.

Разработанная методика была применена для расчета прочности стрелового устройства portalного крана при минимальной температуре эксплуатации. Расчет показал, что условие (5) выполняется при заданных условиях работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ экспериментальных и теоретических исследований сопротивления стальных деталей и конструкций разрушению, а также отечественных и зарубежных нормативных методов подтверждения хладостойкости металлических конструкций машин и оборудования.

2. Предложена диаграмма разрушения элемента конструкции с концентратором, отражающая влияние конструктивно-технологических факторов и условий нагружения. Выполнен анализ параметров диаграммы разрушения и определены интервалы их значений для типичных конструктивных концентраторов.

3. Разработана методика экспериментально-расчетного определения параметров диаграммы разрушения сварного узла, которая включает специальную конструкцию образца, методику его испытания и конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния.

4. Выполнено экспериментально-расчетное исследование параметров диаграммы разрушения сварных узлов из конструкционных сталей, которое подтвердило адекватность предложенной методики и приемлемость базовой модели разрушения.

5. На основании конечно-элементного анализа параметров упруго-пластического напряженно-деформированного состояния сварных узлов, характерных для машиностроительных конструкций, разработана инженерная методика, позволяющая произвести приближенную оценку местных пластических

деформаций, используя результаты упругого конечно-элементного анализа конструкции.

б. Предложена инженерная методика расчета металлических конструкций машин на прочность, построенная на базе деформационного критерия прочности. Данный критерий использует локальные параметры напряженно-деформированного состояния сварного узла и учитывает конструктивно-технологические характеристики и низкие климатические температуры эксплуатации конструкции. Критерий базируется на предложенной диаграмме разрушения и методике экспериментально-расчетного определения ее параметров.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Плотников, Д. Г. Методика оценки прочности металлических конструкций подъемно-транспортных машин / Плотников, Д. Г., Соколов, С.А., Боровков, А.И., Михайлов, А.А. // журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» – СПб, 2015, № 1 (214) – с. 186 - 193.

2. Плотников, Д. Г. Методика прогнозирования разрушения сварных металлических конструкций подъемно-транспортных машин / Плотников, Д. Г., Соколов, С. А. // журнал «Ремонт, восстановление, модернизация». – М., 2015, №12 – с. 22 - 28.

ПРОЧИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Плотников, Д. Г. Анализ пластических свойств сварных соединений / Плотников, Д. Г., Соколов, С. А. // В книге: Неделя науки СПбГПУ материалы научно-практической конференции с международным участием. Редакционная коллегия: М.С. Кокорин (ответственный редактор) и др. – Санкт-Петербург, 2014, – с. 278 - 280.

2. Плотников, Д. Г. Оценка пластических свойств элементов крановых конструкций / Плотников, Д. Г., Соколов, С. А. // В книге: Неделя науки СПбПУ Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ – Санкт-Петербург, 2015, – с. 334 - 337.