М 457546

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

БАЗАРБАЕВ Серик Султанович

УДК: 621.874.2:539.56

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЗЛОВ КРАНОВЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

05.05.05 - Подъемно-транспортные машины

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.Б.Вершинский

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор В.С.Игнатьева
кандидат технических наук Ф.К.Клашанов

Ведущая организация – завод ПТО им. В.И.Ленина, г. Харьков

Защита состоится "15" июня 1987 г. на заседании специализированного Совета К 053.15.10 в Московском высшем техническом [illegible] 107005, г.Моск[illegible] МВТУ им. Н[illegible] тью, прось[illegible] г.

М45546

СПЕЦИ[illegible] ин

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1457546
Базарбаев С.С.Разработка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В решениях XXVI съезда КПСС указывается, что необходимо "наращивать выпуск высокопроизводительных машин и оборудования, предназначенных для эксплуатации в Сибири, на Дальнем Востоке и Крайнем Севере", где сосредоточены основные сырьевые и энергетические ресурсы нашей страны, при существенном увеличении производства "средств механизации и автоматизации подъемно-транспортных, погрузочно-разгрузочных и складских работ".

В настоящее время проблема недостаточной сопротивляемости хрупким разрушениям металлических конструкций подъемно-транспортных машин (ПТМ) стоит достаточно остро. Хладноломкость стали в конструкциях ведет к неоправданному перерасходу затрачиваемых на их изготовление средств. Все это ставит перед конструкторами, инженерами и исследователями задачу по созданию высоконадежной подъемно-транспортной техники, пригодной к эксплуатации в условиях пониженных температур.

1457546

Анализ случаев хрупких разрушений металлических конструкций кранов показывает, что усталостные трещины, возникающие в процессе эксплуатации в зонах сварных соединений при приварке второстепенных элементов (в крановых металлоконструкциях это - диафрагмы, кронштейны, "петушки" и др.) короткими швами, являются потенциальными очагами разрушений при пониженной температуре. Это объясняется тем, что в зонах концов шва имеет место конструктивно-технологическая концентрация напряжений. Конструктивная концентрация напряжений обуславливается геометрией сварного соединения (наличие элемента жесткости), а технологическая - остаточными напряжениями растяжения (трехмерными либо двумерными) у концов шва. В связи с этим разработку более совершенных кранов необходимо вести с учетом несущей способности конструкций, имеющих остаточные напряжения и деформации. Вопрос возникновения объемных остаточных напряжений необходимо рассматривать в зависимости от режимов сварки и толщины свариваемых элементов.

В сварных конструкциях, не подвергшихся специальной термической обработке, остаточные сварочные напряжения часто достигают предела текучести. Параметры линейной механики разрушения недостаточно полно описывают процесс разрушения в сварных узлах таких конструкций.

МГТУ им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Для расчета несущей способности крановых металлоконструкций при пониженной температуре с учетом влияния объемных остаточных напряжений существующие методы недостаточны. В связи с этим, создание метода расчета несущей способности конструкции с учетом остаточных напряжений, в том числе и объемных, на основе параметра разрушения - энергетического контурного J - интеграла и обоснование конструктивно-технологических мероприятий, обеспечивающих повышение несущей способности крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур, является актуальной задачей.

Цель исследования. Данная работа посвящена созданию расчетного метода определения несущей способности сварных узлов крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур с использованием энергетического параметра разрушения, анализу несущей способности и обоснованию мероприятий, направленных на ее повышение.

Методы исследования. Расчетные исследования, проведенные в диссертации, осуществляются с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке и теории пластического течения с применением быстродействующих ЭВМ, обладающих большим объемом оперативной памяти.

Экспериментальный метод определения характеристик трещиностойкости основан на испытаниях на статическое растяжение образцов, имитирующих типовые сварные узлы крановых металлоконструкций, при пониженных температурах.

Научная новизна. В данной работе разработан алгоритм расчетного определения энергетического параметра разрушения в сварных узлах крановых металлоконструкций с учетом остаточных напряжений. Указанный алгоризм основывается на следующих новых результатах, полученных в данном исследовании:

- разработана процедура интегрирования по контуру вокруг вершины трещины для определения величины J - интеграла при решении трехмерных задач с учетом остаточных напряжений после сварки;

с целью ее реализации:

- разработан способ автоматической подготовки исходных массивов остаточных напряжений и деформаций и распределения их по объему узла с трещиной;

- применен способ конечно-элементной дискретизации сварного узла с трещиной, предусматривающий сгущение сетки конечных элементов у вершины трещины.

Выявлено, что возникающие при неполном проплавлении пласти-

ны по толщине объемные остаточные напряжения растяжения повышают склонность сварного соединения в конструкциях, выполненных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, к хрупкому разрушению. Расчетным и экспериментальным путем показана возможность ускоренного развития трещины у конца сварного шва.

Установлено, что выполнение сварных швов типовых узлов крановых металлоконструкций на режимах сварки с полным проплавлением по толщине обеспечивает больший коэффициент запаса по J – интегралу и позволяет повысить предельную нагрузку. Так, при температуре эксплуатации – 50°С повышение предельной нагрузки составляет 38%.

Практическая ценность. Разработан алгоритм и программа расчета напряженно-деформированного состояния трехмерного тела с трещиной и определения величины энергетического контурного J – интеграла с учетом остаточных сварочных напряжений.

При помощи разработанной программы рассчитываются объемные напряжения и деформации и величина энергетического параметра разрушения тела с трещиной после сварки при воздействии внешней статической нагрузки. Применение разработанного метода и программы расчета позволяют проводить расчет несущей способности крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур.

Предложены конструктивно-технологические мероприятия, направленные на повышение несущей способности металлических конструкций кранов при эксплуатации в условиях пониженных температур.

Реализация результатов работы. Результаты теоретического и экспериментального исследования влияния остаточных сварочных напряжений на несущую способность узлов крановых металлоконструкций, а также конструктивно-технологические мероприятия, направленные на повышение несущей способности металлических конструкций кранов в условиях пониженных температур, использованы во ВНИИПТМАШ, г.Москва и АЗТМ, г.Алма-Ата.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на ежегодных научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины и оборудование" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1984, 1985, 1986 гг.), на научно-технических конференциях молодых ученых конструкторско-механического факультета МВТУ им. Н.Э.Баумана (1985, 1986 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в пяти печатных работах и двух научных отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, приложения, списка литературы, включающего 190 наименований и содержит 145 страниц машинописного текста, 66 рисунков, 12 таблиц и приложения на 23 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования.

В первой главе проводится анализ причин хрупких разрушений металлических конструкций подъемно-транспортных машин, приводятся статистические данные об отказах и случаях разрушений кранов при эксплуатации их в условиях пониженных температур, отмечаются факторы, способствующие возникновению и распространению хрупких трещин, отмечаются характерные места зарождения разрушений. Делается вывод о том, что хрупкое разрушение может появиться в результате неблагоприятного сочетания нескольких факторов, а именно: пониженной температуры, увеличенных скоростей деформирования, химического состава металла, масштабного фактора, наличия конструктивных концентраторов напряжений, наличия остаточных напряжений от сварки. Отмечается, что остаточные напряжения могут оказывать заметное влияние на характеристики разрушения в сочетании с другими факторами, например, пониженной температурой.

Рассматривается вопрос о влиянии остаточных сварочных напряжений на несущую способность крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур, показана отрицательная роль, которую они играют при зарождении и распространении разрушений. При оценке влияния остаточных напряжений и деформаций на прочность металлических конструкций кранов при пониженных температурах принимается во внимание, что остаточные напряжения действуют на сварную конструкцию так же, как и напряжения от внешней нагрузки. Поэтому необходимо учитывать их величину и распределение. При этом большая концентрация остаточных деформаций может привести к исчерпанию пластичности и таким образом повлиять на прочность сварного соединения при низкой температуре. Влияние остаточных напряжений зависит от степени многоосно-

сти напряженного состояния, а также от свойств металла и наличия в нем дефектов.

При проектировании сварных металлоконструкций необходимо избегать обстоятельств, снижающих хладостойкость, в частности, трехосного напряженного состояния (М.М.Гохберг). Этим объясняются ограничения толщин проката, применяемых в краностроении, с целью избежать появления объемных остаточных напряжений от сварки.

Для оценки работоспособности конструкций находят применение как концепции классических (А.Ф.Иоффе, Н.Н.Давиденков), так и энергетических теорий прочности. Значительный вклад в развитие энергетических теорий хрупкой прочности внесли советские и зарубежные ученые: Г.И.Баренблатт, В.С.Иванова, А.Я.Красовский, Н.А.Махутов, Е.М.Морозов, В.В.Панасюк, Б.З.Партон, Г.С.Писаренко, С.А.Христианович, Г.П.Черепанов, А.Гриффитс, Д.Ирвин, Х.Кихара, Е.Орован, Дж.Райс, М.Саката, А.Уэллс, Дж. Холл и др.

Известные экспериментальные методы не позволяют дать количественную оценку склонности к хрупкому разрушению сварной конструкции, имеющей объемные остаточные напряжения. Для аналитических методов эта задача практически трудно осуществима. На помощь в этом случае приходят численные методы расчета, например, МКЭ в трехмерной постановке в сочетании с теорией пластического течения.

Исходя из проведенного анализа методов расчета на хрупкую прочность конструкций и рассмотрения влияния остаточных сварочных напряжений на несущую способность крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур, сформулированы основные задачи исследования:

I. Разработка расчетного метода определения энергетического параметра, контролирующего разрушение, - J - интеграла Г.П.Черепанова-Дж.Райса для областей, где имеет место объемное напряженное состояние в сварных крановых металлоконструкциях, на основе МКЭ в трехмерной постановке в сочетании с теорией пластического течения.

2. Создание программы расчета по разработанному алгоритму, реализующей решение следующих вопросов: автоматизацию подготовки исходных массивов остаточных напряжений и деформаций; определение напряженно-деформированного состояния трехмерного тела

с трещиной; определение величины J - интеграла.

3. Проведение экспериментальных исследований влияния остаточных напряжений, в том числе и объемных, и разработанных конструктивно-технологических мероприятий на несущую способность сварных узлов крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур.

4. Разработка рекомендаций по расчету несущей способности узлов крановых металлоконструкций на основе параметра механики разрушения и обоснование конструктивно-технологических мероприятий, направленных на повышение несущей способности крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур.

Во второй главе представлен алгоритм численного решения задачи определения напряженно-деформированного состояния трехмерного тела с трещиной с учетом остаточных сварочных напряжений и определения величины интеграла Черепанова-Райса. При создании алгоритма (программы) расчета были приняты следующие основные положения:

- расчет напряжений и деформаций проводится на основе теории пластического течения;
- принимается модель идеального упруго-пластического тела, удовлетворяющего критерию текучести Губера-Мизеса;
- используется МКЭ в варианте перемещений как численный метод решения задачи пластического течения.

Рассматривается упруго-пластическое деформирование тела с трещиной после сварки, дискретизированного на объемные тетраэдральные конечные элементы при нагружении его равномерно распределенной по сечению статической нагрузкой.

Разработан способ подготовки исходных массив в связи и координат МКЭ, основанный на дискретизации тела с трещиной на составные элементы со сгущением у вершины трещины, которые впоследствии разбиваются на составляющие их тетраэдры, а также способ автоматического ввода массивов остаточных напряжений и деформаций и распределения их по объему тела с трещиной.

На основе теории пластического течения используется уравнение связи между напряжениями и деформациями в форме приращение напряжений - приращение деформаций

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\varepsilon\}, \qquad (I)$$

где $[D_{ep}]$ - матрица упруго-пластичности.

Используя основные соотношения МКЭ и уравнение связи, име-

ем условие равновесия упруго-пластического тела при любом уровне нагрузки

$$\{\Psi\} = \{R\} - \int_V [B]^T \{\sigma\}\, dV = 0, \qquad (2)$$

где $\{R\} = \Sigma \{dRi\}$ - достигнутый уровень внешней нагрузки, $[B]$ - матрица градиентов, $\{\sigma\}$ - вектор-столбец полных напряжений.

В данной работе для реализации упруго-пластического приближения использовался метод начальных напряжений (МНН), разработанный О.Зенкевичем. Алгоритм МНН кратко записывается в виде

$$\begin{aligned} &\{\Delta\sigma\}i = [Ke]^{-1}\{\Psi\}_{i-1};\ \{\varepsilon\}i = \{\varepsilon\}_{i-1} + \{\Delta\varepsilon\}i;\\ &\{\delta\}i = \{\delta\}_{i-1} + \{\Delta\delta\}i;\ \{\sigma\}i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta\sigma\}i;\\ &\{\Psi\}i = \{R\} - \int_V [B]^T \{\sigma\}i\, dV, \end{aligned} \qquad (3)$$

где i - номер итерации. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнен выбранный критерий сходимости.

При решении задачи определения величины параметра разрушения в трехмерной постановке принимали, что плоскость контура интегрирования перпендикулярна фронту трещины. При этом интеграл сводился к выражению

$$J_K = \int_C \left(W(\varepsilon ij)n_K - \sigma ij \frac{\partial Ui}{\partial X_K} nj\right) dC + \int_A \left(\sigma ij \frac{\partial \varepsilon^p_{ij}}{\partial X_K} - \frac{\partial}{\partial X_3}\left(\sigma i_3 \frac{\partial Ui}{\partial X_K}\right)\right) dA, \qquad (4)$$

где $W(\varepsilon ij)$ - плотность энергии деформации; ε^p_{ij} - пластическая деформация; n_K - компонент внешней нормали к контуру C, проходящему в непосредственной близости от вершины трещины; σij, Ui - напряжения и перемещения в системе координат трещины; A - площадь вокруг контура; C - контур интегрирования; dC - элемент длины контура.

Полный контурный интеграл получали сложением контурных интегралов, проходящих через центры тяжести конечных элементов, охваченных контуром C. Интегрированием формулы (4) были получены аналитические выражения для определения компонентов J - интеграла. При этом использовались соотношения Коши и формулы МКЭ. Интегрирование велось по координате, не являющейся константой для данных точек интегрирования.

Результирующее выражение для J - интеграла (4) представляет собой геометрическую сумму его составляющих (К = I,2,3)

$$J = \sqrt{J_1^2 + J_2^2 + J_3^2} \qquad (5)$$

На основе разработанного алгоритма создана универсальная программа расчета CRACK для ЭВМ серии ЕС.

В данной главе также рассматриваются отдельные особенности разработанного алгоритма и программы, проведено сопоставление некоторых расчетных данных с расчетными данными других исследователей (Е.М.Морозов, Г.П.Никишков).

В третьей главе изложены методика и результаты экспериментального исследования несущей способности узлов металлических конструкций кранов при пониженных температурах. Исследуется влияние объемных остаточных напряжений после сварки на хладостойкость сварных узлов с помощью сварных образцов с надрезами, имитирующих исходные дефекты типа усталостных трещин, возникающих в местах приварки элементов жесткости в процессе эксплуатации. При выборе формы и типоразмеров образцов учитывались следующие требования: универсальность модели, позволяющая варьировать размеры швов, их ориентацию по отношению к действующему усилию; приближение модели по масштабу и технологии изготовления к реальной конструкции; возможность испытания образца в холодильной камере. Для получения характеристик трещиностойкости в сварном образце изготавливался надрез типа трещины.

Определяемые в данной работе характеристики трещиностойкости использовались для сравнения по ним различных вариантов технологического процесса изготовления, например, различных режимов сварки, для расчетов прочности несущих элементов с учетом их конструктивных форм и условий эксплуатации. По результатам испытаний определялись следующие характеристи трещиностойкости: силовая - номинальное разрушающее напряжение σ_c (по сечению, ослабленному трещиной) деформационная - критическое раскрытие трещины δ_c, энергетическая J_c.

При анализе влияния объемности остаточного напряженного состояния после сварки на хладостойкость сварного узла варьировались как толщина образца, так и режимы сварки. Известно, что при неполном проплавлении по толщине пластины, имеющем место при режиме сварки с малой величиной удельной погонной энергии сварки (В.И ахненко, В.С.Игнатьева и др.), возникают объемные остаточные напряжения растяжения, достигающие значительной величины в зонах концов ш а. Наличие этих напряжений оказывает

существенное влияние на прочность сварного соединения в условиях пониженных температур при невысокой пластичности металла. Результаты испытаний сварных образцов с надрезами в холодильной камере показали, что для образцов из стали Ст3 толщиной δ = 16 мм с коротким швом, выполненным на режиме сварки с величиной удельной погонной энергии сварки q_n/δ =14200 Дж/см^2, увеличение разрушающей нагрузки со снижением температуры до -50°С составило 26% по сравнению с образцами, выполненными при режиме сварки с q_n/δ = 4530 Дж/см^2. Надрез располагался у конца шва.

Установлено, что конструктивно-технологические мероприятия, заключающиеся в разделении конструктивного и технологического концентраторов напряжений путем вывода конца сварного шва за привариваемый угловым швом элемент жесткости, повышают разрушающие напряжения при испытаниях образцов (из материала сталь 09Г2С) при температуре -55°С на 29% по сравнению с образцами, выполненными по обычной технологии при толщине образца δ = 16 мм. Проведение подобных мероприятий при приварке элементов типа швеллера дает повышение разрушающей нагрузки на 24% при температуре испытания - 60°С и толщине образца δ = 14 мм. Также выявлено, что проведение мероприятий, заключающихся в наложении на концевую зону соединения второго шва, тепловое воздействие которого вызывает перераспределение напряжений в концевой зоне, снижает объемность остаточного напряженного состояния и позволяет повысить разрушающую нагрузку при температуре -60°С на 17% при толщине пластины δ = 14 мм.

Было проведено численное моделирование процесса деформирования образца с приварным элементом жесткости, расположенным перпендикулярно прикладываемому усилию, с помощью разработанного алгоритма. Результаты численного решения и экспериментального исследования (запись диаграммы "нагрузка - смещение") дают удовлетворительную сходимость, что свидетельствует о корректности разработанного алгоритма и получаемых с его помощью решений.

Критическая величина J - интеграла - J_c - определялась по диаграмме деформирования образца с помощью соотношения

$$J = \frac{M}{F_0}\int_0^{V_c} P\,dV, \qquad (6)$$

где P -приложенное усилие, V - перемещение точки приложе-

ния силы, V_c – его конечное значение, F_o – площадь неразрушенного сечения по линии трещины, M =2 – численный коэффициент. При $V = V_c$ получим, что $J = J_c$.

Используя полученные значения J_c , строили графики зависимости величины вязкости разрушения от температуры испытания (рис.I) для образцов, выполненных на различных режимах сварки. Установлено, что с увеличением объемности напряженного состояния в сварных пластинах, возникающем при выполнении сварки на режимах с неполным их проплавлением, критическое значение J_c уменьшается. Особенно сильно это проявляется при снижении температуры от $-30^{\circ}C$ и ниже.

Известно, что предварительное циклическое нагружение существенно снижает сопротивляемость конструкции возникновению хрупких разрушений ввиду появления острого концентратора – усталостной трещины. Поэтому были также проведены испытания на усталость и прочность сварных образцов с элементами жесткости, места приварки которых короткими швами являются зонами зарождения усталостных трещин. Для уменьшения концентрации напряжений производилось разделение конструктивного (элемента жесткости) и технологического (конца сварного шва) концентраторов напряжений путем вывода сварного шва на 20 мм по обе стороны от элемента жесткости, а также выполнение шва на режиме сварки, обеспечивающем полное проплавление по толщине, что позволило увеличить долговечность сварного узла на 42% при $+20^{\circ}C$.

Была проведена расчетная оценка влияния остаточных напряжений, имеющих место при приварке элементов жесткости по обычной технологии и по рекомендуемой, на предел выносливости сварного соединения $\sigma_{вн}$, рассчитанного по одной из существующих методик (Шкевич В.Н.). Установлено, что применение рекомендуемых мероприятий позволяет повысить предел выносливости таких сварных соединений на 44%, что соответствует данным, полученным в результате экспериментального исследования. Годовой экономический эффект от использования этих мероприятий на один мостовой кран составляет в среднем I2 руб.

В <u>четвертой главе</u> проводится анализ несущей способности сварных узлов крановых металлоконструкций при пониженных температурах, приводятся результаты расчетного исследования. В настоящее время расчет сварных узлов с трещинами на прочность сводится к расчету по одному из критериев нелинейной механики разрушения

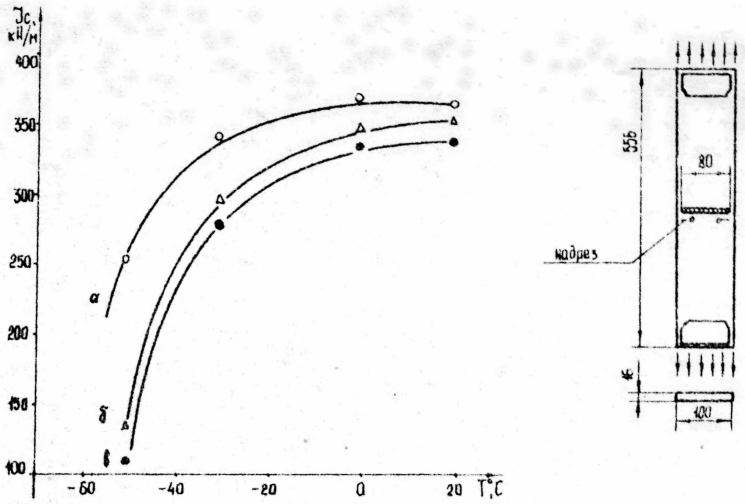


Рис. I. Зависимость величины вязкости разрушения J_c от температуры испытаний для образцов с короткими швами, выполненными на различных режимах сварки (а – режим сварки с q_n/δ = I4200 Дж/см^2; б – q_n/δ = 4530 Дж/см^2; в – q_n/δ = 4250 Дж/см^2)

(Г.С.Писаренко, В.Л.Науменко). Решение вопроса о том, какой из критериев использовать в расчете, определяется наличием нужных для расчета критериальных характеристик данного материала и возможностью их реализации в расчетной схеме для конкретного соединения.

Экспериментально показано (глава 3), что температура -60°С приводит к повышению пределов текучести используемых низкоуглеродистых и низколегированных сталей примерно на 18% по сравнению с испытаниями образцов из сталей Ст3 и 09Г2С в условиях комнатной температуры, к появлению хрупкой составляющей в изломах образцов с надрезами при испытании их в холодильной камере.

С помощью разработанного алгоритма и программы CRACK (глава 2) была решена задача о нагружении пластины с центральной трещиной.

Величина J_c определялась по диаграмме "нагрузка - смещение" при испытании образца на статическое растяжение. Показано,

что при нагрузках, меньших критической P_c, величина J - интеграла будет меньше своей критической величины J_c, определяемой из опыта, лишь приближаясь к ней. При этом различие между критической величиной J - интеграла, определенной из эксперимента, и величиной J - интеграла, соответствующей критической нагрузке, полученной теоретическим путем, не превышает 15,0%, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Проведено исследование процесса нагружения пластин с различными толщинами. Полученные результаты показали, что для пластины большей толщины величина параметра разрушения быстрее стремится достичь своего критического значения, чем в случае деформирования пластины, имеющей меньший размер по толщине. Выявлено также изменение величины J - интеграла по толщине образца в зависимости от приложенной нагрузки. Показано, что для малых нагрузок J - интеграл почти не меняется по толщине, а [illegible] нагрузок, близких к пределу текучести, величина интеграла в центре образца на 77% выше, чем на его поверхности. Также показано, что J - интеграл в центре образца растет при нагружении быстрее, чем на поверхности, то есть, в элементах конструкции, имеющих большой размер по толщине, трещина начинает распространяться в его срединных слоях, оставаясь неподвижной на поверхности. Подобные результаты были получены также M. Sakata с соавторами, Т.А.Черныш.

Проведена расчетная оценка влияния объемных остаточных напряжений на склонность к разрушению тела с трещиной. С этой целью была решена задача о деформировании пластины с коротким швом при приложении внешней растягивающей нагрузки. При этом трещина располагалась таким образом, чтобы ее вершина находилась в зоне максимальных остаточных растягивающих напряжений - у конца сварного шва. Объемность остаточного напряженного состояния регулировали, варьируя режимы сварки. Полученные решения показывают, что при нагружении сварных образцов, выполненных на режимах с малой величиной удельной погонной энергии (с неполным проплавлением по толщине), величина J - интеграла ближе к своему критическому значению и быстрее достигает его, нежели в случае полного проплавления пластины по толщине. На рис. 2 представлены зависимости J - интеграла от напряжения при температуре -50°С. Отсюда следует, что наличие объемных остаточных напряжений после сварки, возникающих при неполном

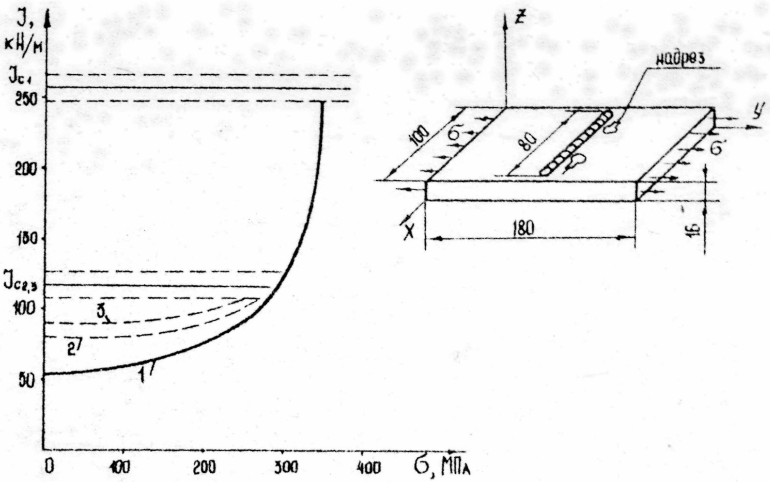


Рис. 2. Зависимость J - интеграла от напряжения для образца с коротким швом, выполненным на различных режимах сварки: I - режим сварки с q_n/δ = I4200 Дж/см^2; 2 - q_n/δ = 4530 Дж/см^2; 3 - q_n/δ = 4250 Дж/см^2

проплавлении элементов по толщине, повышает склонность сварного узла к разрушению. Установлено также, что расположение трещины у конца сварного шва снижает несущую способность соединения при пониженной температуре.

Определено влияние разделения конструктивного и технологического концентраторов напряжений (путем выведения концов сварного шва за пределы привариваемого элемента жесткости) на склонность сварного соединения к разрушению. Выявлено, что указанные мероприятия влияют на величину параметра разрушения, повышая запас m по отношению к ее критическо.. величине.

Обоснована методика расчета на прочность на основе J - интеграла. Расчетное уравнение для тела с трещиной

$$J = J_c / m, \qquad (7)$$

где J - J - интеграл узла конструкции, вычисленный для расчетного уровня напряжений σ_p ; J_c - критическая величина

J - интеграла, определенная экспериментально на стандартном образце; m - коэффициент запаса по J_c. При $m = 1$ имеем $J = J_c$ - страгивание трещины, при $m > 1$ - конструкция работоспособна. В случае $m < 1$ - возникновение лавинообразного разрушения. Ремомендуемая величина коэффициента запаса по J - интегралу для расчета сварных узлов крановых металлоконструкций $m = 1{,}6 \div 2{,}0$.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе изучения и обобщения случаев отказов и анализа причин разрушений крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур были выявлены наиболее общие причины хрупких разрушений и характерные места зарождения хрупких трещин. Установлено, что наиболее эффективными методами повышения несущей способности узлов крановых металлоконструкций при пониженной температуре являются мероприятия, основанные на уменьшении конструктивно-технологической концентрации напряжений и снижении объемности остаточных напряжений в зонах сварных соединений.

2. Разработан алгоритм решения задачи определения напряженно-деформированного состояния сварного узла с трещиной и определения величины параметра разрушения - энергетического контурного J - интеграла с учетом остаточных сварочных напряжений. В основу алгоритма положен МКЭ в сочетании с теорией пластического течения. Указанный алгоритм базируется на следующих новых результатах, полученных в данной работе: разработана процедура интегрирования по контуру вокруг вершины трещины для определения величины J - интеграла при решении трехмерных задач с учетом остаточных напряжений после сварки на основе использования способа автоматической подготовки исходных массивов остаточных напряжений и деформаций и распределения их по объему узла с трещиной и применения способа конечно-элементной дискретизации этого узла, предусматривающего сгущение сетки конечных элементов у вершины трещины.

3. Составлена универсальная программа для расчета напряженно-деформированного состояния сварного узла с трещиной и вычисления J - интеграла с учетом остаточных напряжений после сварки. Программа составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IУ применительно к ЭВМ серии ЕС.

Достоверность результатов расчета подтверждена сравнением с расчетными исследованиями других авторов и сопоставлением с экспериментальными данными, полученными в работе.

4. С помощью разработанных метода расчета и экспериментальной методики исследовано влияние объемных остаточных напряжений, возникающих при выполнении типовых сварных узлов крановых металлоконструкций на различных режимах сварки, на несущую способность этих узлов в условиях пониженных температур.

С использованием J - интеграла проведен расчет несущей способности узлов крановых металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях пониженных температур. Установлено, что возникающие при неполном проплавлении элементов по толщине объемные остаточные напряжения повышают склонность сварного узла к хрупкому разрушению. Расчетным и экспериментальным путем показана возможность ускоренного развития трещины у конца сварного шва.

Выявлено, что выполнение коротких сварных швов на режиме с полным проплавлением элементов по толщине обеспечивает больший запас по J - интегралу и позволяет повысить предельную нагрузку на 38% при температуре эксплуатации -50°С.

5. Установлено, что мероприятия, основанные на разделении конструктивного и технологического концентраторов напряжений путем вывода сварного шва за пределы привариваемого элемента понижают склонность сварного узла к хрупкому разрушению, и, тем самым, повышают несущую способность конструкции в условиях пониженных температур. Показано, что при этом разрушающая нагрузка повышается на 29% (при температуре -55°С), а повышение долговечности сварного узла достигает 42% (при +20°С).

Применение указанного способа приварки элементов жесткости короткими швами, выполненных на режимах сварки с полным проплавлением элементов по толщине, позволяет получить годовой экономический эффект от применения этих мероприятий в среднем 12 руб. на один кран.

6. На основе проведенных расчетных и экспериментальных исследований и из условия предотвращения хрупкого разрушения сварных узлов крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур, рекомендован коэффициент запаса для расчетов на прочность с использованием J - интеграла m = 1,6÷2,0.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

I. Базарбаев С.С. Несущая способность узлов крановых металлоконструкций в условиях пониженных температур // Изв. вузов. Машиностроение. - 1986. - № 12. - С. 78-83.

2. Базарбаев С.С. Хрупкие разрушения металлических конструкций подъемно-транспортных машин // Теория, расчет и исследование подъемно-транспортных машин. Межвузовский сборник научных трудов. - Алма-Ата: КазПТИ, 1985. - С. 93-98.

3. Вершинский А.В., Воронцов Г.А., Базарбаев С.С. Несущая способность узлов металлических конструкций подъемно-транспортных машин в условиях низких температур // Конструирование и эксплуатация подъемно-транспортных машин. - Тула: ТПИ, 1985. - С. 3-10.

4. Вершинский А.В., Нургужин М.Р., Базарбаев С.С. Определение объемных остаточных напряжений и деформаций в сварных узлах крановых металлоконструкций // Теория, расчет и исследование подъемно-транспортных машин. - М., 1985. - С. 97-113. - (Тр. МВТУ; № 438).

5. Нургужин М.Р., Сивоглазов А.С., Базарбаев С.С. Применение метода конечных элементов для расчета крановых металлоконструкций // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 7. - С. 160.

Объем I п.л. Тираж 100 экз. Типография МВТУ

Л - 44835. Подписано к печати 04.05.87г. Зак. 544

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА