

На правах рукописи

ВАН Юаньцин

УДК 624.014.072

**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА
ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ
ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ**

**Специальность 05.23.01 — Строительные конструкции,
здания и сооружения**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

76 27 003

Работа выполнена в Днепропетровском инженерно-строительном институте.

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники Украины,
доктор технических наук, профессор
А. В. СИЛЬБЕСТРОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
М. И. КАЗАКЕВИЧ

(ПИ "Днепрпроектстальконструкция")
кандидат технических наук, доцент
Ю. А. ЗДАНЕВИЧ (ДНИТ)

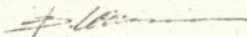
Ведущая организация: Днепропетровский завод металлических конструкций им. И. В. БАБУШКИНА
г. Днепропетровск

Защита состоится "23" июня 1993 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании специализированного Совета К 068.32.01 Днепропетровского инженерно-строительного института по адресу: 320600, г. Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24а, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас принять участие в защите и направить Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах в специализированный Совет по указанному адресу.

Автореферат разослан "14" мая 1993 г.

Ученый секретарь специализированного Совета,
кандидат технических наук, доцент  В. Л. Седин

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00815142 (L)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Хрупкое разрушение элементов стальных конструкций является одним из наиболее опасных видов их необратимых предельных состояний, которое проявляется при воздействии физических и конструктивно-технологических факторов, тормозящих развитие пластических деформаций в элементах при их растяжении. В первую очередь к таким факторам относятся снижение температуры, динамическая нагрузка, высокий уровень концентрации напряжений, последствия термопластических деформаций в зонах термического влияния сварки. В особой степени проблема хрупкого разрушения стальных конструкций обостряется в связи со строительством зданий и сооружений со стальным каркасом в регионах с суровым климатом в связи с воздействием низких температур при монтаже и эксплуатации конструкций. К таким регионам относятся большинство стран Северной Европы, Сибирь, Канада, Север США и Японии. Для ряда северных районов Китая снижение температуры в зимний период достигает $-35 - 50^{\circ}\text{C}$. Вероятность хрупкого разрушения стальных конструкций существенно возрастает с увеличением масштаба их элементов, что является определенным затруднением в использовании принципа концентрации материала, являющимся одним из основных принципов снижения металлоемкости.

В настоящее время проблема хрупкого разрушения стали и элементов конструкций остается нерешенной. Это связано с тем, что еще не найден общепринятый критерий оценки склонности стали к хрупкому разрушению, не достаточно изучен ряд факторов, способствующих хрупкому разрушению стали, например, масштабного фактора и многих технологических факторов. В инженерной практике не разработан общепринятый расчетный метод по оценке прочности

элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения.

В действующих нормах СНГ по проектированию стальных конструкций СНиП II-23-81* впервые введен метод по проверке прочности некоторых категорий элементов, однако этот метод не обладает строгим теоретическим обоснованием и требует совершенствования. Ряд других методов по оценке прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения, рекомендуемых к совершенствованию нормативного метода, имеет ряд противоречий. В китайских нормах по проектированию стальных конструкций проблема их хрупкого разрушения не учитывается. Кроме того, в Китае в настоящее время отсутствуют нормы по производству стальных конструкций.

Настоящая работа выполнялась как составная часть научно-исследовательских и конструкторских работ кафедры металлических и деревянных конструкций ДИСИ по повышению надежности стальных конструкций, подверженных воздействию низких температур. Работа координировалась с рядом ведущих научно-исследовательских институтов и в содружестве с организациями, ведущих проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций, а также является частью отраслевой программы по расширению производства термически упрочненных сталей. Данное исследование является рекомендательным материалом к работе по изменению и дополнению китайских норм по проектированию стальных конструкций, а также к подготовке новых китайских норм по производству стальных конструкций, находящихся в виде проекта для обсуждения. Подобная работа проводится в настоящее время рядом научно-исследовательских и учебных учреждений КНР.

Цель работы. Обоснование расчетной оценки прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения и разработка рекомендаций и предложений по предотвращению хрупкого разрушения к китайским нормам.

Задачи исследования.

1. Проанализировать требования, указания и рекомендации в действующих нормах СНГ и КНР, направленные на повышение надежности элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения. Выяснить действенность и значимость отдельных нормативных требований.

2. Проанализировать напряженное состояние в стальных элементах с высоким уровнем концентрации напряжений с учетом масштабного фактора. Установить условия реализации плоской деформации в таких элементах при использовании метода конечных элементов.

3. Сделать оценку уровня концентрации напряжений в стальных элементах с конструктивными формами низкой хладостойкости и оценку влияния масштабного фактора на степень реализации плоской деформации.

4. Провести экспериментальные исследования основных механических характеристик малоуглеродистых, низколегированных и термически упрочненных малоуглеродистых сталей при снижении температуры.

5. Теоретически обосновать расчетную оценку критической температуры хрупкого разрушения элементов стальных конструкций с учетом масштабного фактора и их прочности с учетом хрупкого разрушения, используя результаты многочисленных экспериментальных исследований.

6. Разработать основные рекомендации и предложения по совершенствованию китайских норм с учетом хрупкого разрушения элементов стальных конструкций.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Подробно классифицированы и проанализированы требования, указания и рекомендации в действующих нормах СНГ и КНР, направ-

ленные на повышение надежности элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения.

2. Численным методом конечных элементов установлено условие реализации плоской деформации в элементах стальных конструкций с высоким уровнем концентрации напряжений и оценено влияние масштабного фактора на степень ее реализации.

3. Теоретически установлена линейная зависимость критической температуры хрупкого разрушения от толщины элементов стальных конструкций с высоким уровнем концентрации напряжений, что нашло экспериментальное подтверждение.

4. Обоснована расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения.

5. Разработаны основные рекомендации и предложения по совершенствованию китайских норм с учетом хрупкого разрушения элементов стальных конструкций.

Практическая ценность. Разработанная расчетная оценка критической температуры хрупкого разрушения элементов стальных конструкций позволяет существенно уменьшать стоимость и трудоемкость лабораторных исследований при учете масштабного фактора. Обоснованная оценка прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения развивает и совершенствует нормативный метод и другие инженерные методы.

Разработанные основные рекомендации и предложения позволяют совершенствовать китайские нормы с учетом хрупкого разрушения элементов стальных конструкций.

Реализация исследований. По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по количественной оценке прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения, принятые к использованию в ПИ "Днепрпроектстальконструкция".

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены

на научных семинарах кафедры металлических и деревянных конструкций ДИСИ в 1992-1993 годах, на научно-технической конференции инженерно-строительного факультета университета Цин Хуа (Пекин) в ноябре 1992 года, на научном симпозиуме ЦНИИПСКА КНР в октябре 1992 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации - 207 страниц, в том числе 138 страниц машинописного текста, 51 рисунок и фотографий, 19 таблиц. Список литературы включает 176 наименований, из них 26 иностранных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрена природа и механизм хрупкого разрушения стали; проведена классификация факторов хрупкого разрушения стали и элементов стальных конструкций и проанализирована их значимость путем анализа отказов; рассмотрены основные конструктивные формы низкой хладостойкости, теоретические аспекты хрупкого разрушения и основные инженерные расчетные методы по оценке прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения. На основании приведенного обзора сформулированы цель и задачи исследования.

Проблеме хрупкого разрушения стали и элементов стальных конструкций посвящены исследования многих ученых, например, в бывшем СССР А. Ф. Иоффе, Н. Н. Давиденкова, Н. С. Стрельцкого, Е. О. Патона, Г. В. Ужика, Н. В. Мельникова, Н. А. Махутова, В. А. Балдина, П. И. Соколовского, Н. А. Махутова, Л. А. Копельмана, А. Б. Злочевского,

А. В. Сильвестрова, Ю. Я. Мешкова, С. Д. Шафрая и др. За рубежом этой проблемой занимаются, главным образом, в США, Японии, Англии, Канаде, Бельгии такие ученые, как Т. Екобори, В. Вейс, Е. А. Дэвис, Я. Немец, Х. Кихара, А. Коуэн, У. Холл и др. Эти исследования во многом позволили уяснить природу и механизм хрупкого разрушения стали, оценить количественно или качественно влияние большинства факторов хрупкого разрушения, наметить основные пути в решении проблемы хрупкого разрушения стали в конструкциях.

Согласно многочисленным исследованиям, количество факторов хрупкого разрушения стали и элементов конструкций насчитывается более 30. В основном эти факторы можно условно разделить на три группы: - металлургические; - конструктивно-технологические; - эксплуатационные. По результатам анализа отказов стальных конструкций, значимость этих факторов неоднозначна. Главными и определяющими из них являются следующие: структура и механические характеристики стали, низкая температура, повышение скорости деформирования, напряженное состояние, концентрация напряжений и масштабный фактор. Следует отметить, что хрупкое разрушение не связано с влиянием лишь одного из факторов, а определяется сочетанием ряда неблагоприятных факторов. Отмечено, что среди главных факторов масштабный фактор и фактор влияния напряженного состояния являются недостаточно изученными.

Статистический анализ отказов стальных конструкций позволяет классифицировать немногочисленные типичные конструктивные формы, обладающие пониженной хладостойкостью. Безусловным и общим признаком таких конструктивных форм является наличие высокого уровня концентрации напряжений.

В инженерной практике используются различные расчетные методы для оценки прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения. Среди них главными являются нормативный ме-

год, изложенный в СНиП II-23-81^{*}; метод НИСИ, разработанный в Новосибирском инженерно-строительном институте под руководством А. В. Сильвестрова; и метод ЦНИИПСКА, рекомендуемый ЦНИИПСКом по совершенствованию нормативного метода. В этих методах принята одинаковая расчетная формула:

$$\sigma_{\max} < \beta \cdot R_u / \gamma_u, \quad (1)$$

где σ_{\max} - наибольшее растягивающее напряжение в расчетном сечении элемента, R_u и γ_u - расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению и соответствующий коэффициент надежности, β - расчетный коэффициент, учитывающий снижение прочности с учетом хрупкого разрушения. Разница между этими методами заключается в различных способах определения коэффициента.

Однако, эти три метода в разной степени имеют недостатки и несовершенства. Например, нормативный метод основан на обобщении многочисленных экспериментальных исследований с использованием критерия ударной вязкости стали и не имеет теоретического обоснования; в методе ЦНИИПСКе использованы недостаточно обоснованные методы определения критических температур T_{cr1} и T_{cr2} и два зависимых коэффициента ($\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$) при оценке прочности, что приводит к необоснованно снижению разрушающему напряжению; а метод НИСИ носит несовершенный характер, заключающийся в теоретически необоснованном способе определения T_{cr1} и коэффициента β .

Во второй главе проанализированы основные пути обеспечения надежности стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения, приведена подробная классификация требований, указаний и рекомендаций в действующих нормах СНГ и Китая, направленных на повышение сопротивляемости элементов стальных конструкций хрупкому разрушению и рассмотрена их эффективность.

На основании указанного анализа нами подробно классифицированы основные требования, указания и рекомендации в действующих

нормах СНГ (СНИП 11-23-81* и СНИП 111-18-75) и КНР (GBJ 17-88), направленные на повышение надежности элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения. В нормах СНГ их всего 46, среди них: 23 относится к проектированию, 17 - изготовлению, 2 - транспортировке, 1 - монтажу и 1 - расчетной оценке. В нормах КНР проблема хрупкого разрушения не учитывается, лишь в отдельных пунктах содержатся некоторые требования, указания и рекомендации, направленные на снижение концентрации напряжений и остаточных напряжений, и на выбор марки стали с учетом низких температур. Их число составляет 28, среди них: 23 относится к проектированию, 4 - изготовлению, 1 - транспортировке, 1 - монтажу. Расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций в китайских нормах отсутствует.

Безусловно, что не все требования, указания и рекомендации, приведенные в нашей классификации, равнозначны по их действительности. Изучение этой классификации показывает, что они носят большей частью качественный, а в ряде случаев и неопределенный характер, а некоторые из них имеют строго ограничительный характер. По нашему мнению, устранение этих недостатков во многом связано с необходимостью теоретического и экспериментального обоснования количественной оценки прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения, что и является основной целью нашего исследования.

В третьей главе проанализировано влияние сложного напряженного состояния на развитие пластических деформаций при разрушении и напряженное состояние в зоне острого надреза стального элемента при растяжении; установлено условие реализации плоской деформации в таких элементах с использованием численного метода конечных элементов. Приведена оценка уровня концентрации напряжений для конструктивных форм низкой хладостойкости и влияния масштабного

фактора на степень реализации плоской деформации.

На основании теории пластичности и результатов экспериментальных исследований проанализирована возможность развития пластических деформаций перед разрушением для двух- и трехосного растяжения и доказано, что при таких напряженных состояниях развитие пластических деформаций стали и ее вязкость при разрушении могут существенно уменьшаться, что повышает опасность хрупкого разрушения. Это также свидетельствует о том, что при всестороннем растяжении реализуется хрупкое разрушение без предшествующих пластических деформаций.

В зоне надреза стального элемента при его растяжении, имитирующего элемент стальной конструкции с высоким уровнем концентрации напряжений, создается многоосное напряженное состояние. При достаточно малой толщине, т.е. $t \rightarrow 0$, в окрестностях надреза реализуется плоское напряженное состояние, характеризуемое главными напряжениями $\sigma_y > \sigma_x + 0$, $\sigma_z = 0$. При увеличении t до критической величины t_{cr} (при неизменном радиусе надреза r), в срединной плоскости у вершины надреза реализуется плоская деформация, характеризуемая $\sigma_y > \sigma_x + 0$, $\sigma_z = u(\sigma_x + \sigma_y)$, $\varepsilon_z = 0$, где u - коэффициент Пуассона материала. Доказано, что плоская деформация в большей степени способствует хрупкому разрушению в стальных растягиваемых элементах при наличии концентрации напряжений.

Учитывая решение Г. Нейбера, нами получены упрощенные формулы для распределения главных напряжений в зоне надреза растягиваемого элемента при достаточно остром надрезе ($r \ll t$):

$$\begin{aligned}\sigma_x &= Kt \cdot \sigma_n \cdot j / (1 + 2j)^{3/2}; \\ \sigma_y &= \sigma_1 = Kt \cdot \sigma_n (1 + j) / (1 + 2j)^{3/2}; \\ \sigma_z &= m(\sigma_x + \sigma_y),\end{aligned}\tag{2}$$

где $j = r/r$ (см. рис. 1), m - коэффициент степени реализации плоской деформации, значение которого равно нулю при плоском напря-

женном состоянии, и равно u при плоской деформации.

Отмечено, что существует критическое отношение $(t/r)cr$, при котором в элементе с надрезом реализуется плоская деформация. В соответствии с различными экспериментальными исследованиями, значение $(t/r)cr$ неоднозначно и равно 10 (В. Вейс), 70 - 80 (В. С. Жуковский) и 70 - 85 (А. В. Сильвестров). Для уточнения значения $(t/r)cr$ и определения распределения σ_z по толщине, мы проводили расчеты методом конечных элементов для стального растягиваемого элемента с надрезами и для гладкого изгибаемого элемента. В исследованиях В. Вейса гладкий изгибаемый элемент является аналогом растягиваемого элемента с надрезами.

При расчете элемента с надрезами радиус надреза r принят в сериях 0,4; 1,0; 2,0 и 4,0 мм, а t/r - в сериях 10; 20; 40; 60; 80 и 100. Для изгибаемого элемента отношение ширины к толщине принято в сериях 4; 8; 12; 16; 20. Расчеты проводились на ЭВМ с использованием программы "SAB". По полученным результатам отмечено следующее:

1. Для элемента с надрезом при его растяжении плоская деформация реализуется при $t/r = 80$, что соответствует результатам экспериментальных исследований В. С. Жуковского и А. В. Сильвестрова.

2. Для изгибаемого элемента реализация плоской деформации в центральной точке верхней поверхности происходит при $B/t > 20$. Следовательно, $(t/r)cr = 10$, полученное В. Вейсом, является ошибочным из-за не вполне обоснованного способа анализа, который не учитывает разницы градиента напряжений между аналогами.

3. Зависимость коэффициента n от толщины элемента t при t/tcr в пределах 0,2 - 1,0 может быть аппроксимирована следующей формулой (коэффициент корреляции = 0,957):

$$n = 0,3 - 0,074(t/tcr - 1)^{1,07}, \quad (3)$$

Из-за неопределенности и неконтролируемости уровня concentra-

ции напряжений в конструктивных формах низкой хладостойкости, для инженерной оценки их прочности как учета экстремального неблагоприятного случая, нами показано, что в каждой конструктивной форме реализуется столь высокий уровень концентрации напряжений, что она может быть имитирована растянутым элементом с острым надразом, радиус которого не может быть меньше структурной характеристики материала \dot{r} , предложенной Г. Нейбером. По результатам многочисленных исследований, величина структурной характеристики стали оказывается в пределах 0,4 - 0,5 мм и возрастает при увеличении ее предела прочности. Поэтому в инженерной практике для малоуглеродистых и низколегированных сталей с низкой прочностью, например ВСтЗсп, ВСтЗпс, ВСтЗсп, ВСтЗсп-Т2 (термически упрочненной стали) и 09Г2С, можно принимать $\dot{r} = 0,5$ мм. Следовательно, критическая толщина $t_{cr} = (t/r)cr. \dot{r} = 80. 0,5 = 40$ мм.

В четвертой главе проанализированы методы экспериментальных исследований сопротивления стали и элементов стальных конструкций хрупкому разрушению при низких температурах, и экспериментально исследованы основные механические характеристики малоуглеродистых, низколегированных и термически упрочненных малоуглеродистых сталей.

Все экспериментальные методики основаны на серийных испытаниях образцов специальной формы при статическом или динамическом приложении нагрузки в зависимости от факторов и критериев, которые исследуются. Рассмотрены 15 видов образцов и методики их испытания, которые могут быть классифицированы на 4 группы, и 5 основных способов охлаждения образцов, а также методика испытания крупноразмерных образцов.

Проведен анализ экспериментальных исследований, посвященных проблеме хрупкого разрушения стали и элементов стальных конструкций и выполненных в лабораториях НИСИ, ДИСИ и других учреждений.

Во всех расчетных методах прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения используются те или иные механические характеристики стали, которые существенно изменяются при снижении температуры. Поэтому необходимо экспериментально исследовать основные механические характеристики сталей, которые в настоящее время чаще всего применяются, при снижении температуры. Среди них главными являются: предел текучести ($\bar{\sigma}_T$), временное сопротивление стали ($\bar{\sigma}_B$), относительное сужение (\bar{W}) и относительное удлинение δ_s .

Исходя из результатов многочисленных экспериментальных исследований, при естественных низких температурах (до -70°C), значения $\bar{\sigma}_T$ и $\bar{\sigma}_B$ достаточно точно могут быть выражены формулами:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_T &= \bar{\sigma}_{T0} \cdot \text{EXPI}^{q_s}(\bar{T} - T); \\ \bar{\sigma}_B &= \bar{\sigma}_{B0} \cdot \text{EXPI}^{q_b}(\bar{T} - T).\end{aligned}\quad (4)$$

где $\bar{\sigma}_{T0}$ и $\bar{\sigma}_{B0}$ - предел текучести и временное сопротивление стали при комнатной температуре $\bar{T} = 20^\circ\text{C}$, q_s и q_b - коэффициенты температурной чувствительности предела текучести и временного сопротивления стали, значения которых являются главными расчетными параметрами в нашей дальнейшей расчетной оценке прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения. Поэтому мы проводили эксперименты стандартных образцов по ГОСТу 11150-84 с целью определения q_s и q_b для различных сталей.

Образцы при наших экспериментальных исследованиях изготовлены с диаметром 5 мм из следующих марок стали: **BCr3сп**, **BCr3сп-T2** и **09Г2С**. Для каждой стали испытания проводились при трех температурах ($+20^\circ\text{C}$, -20°C и -60°C). Испытания проводились с использованием комплексной испытательной установки "INSTRON". Результаты испытания показаны в табл. 1.

В пятой главе рассмотрены общие сведения о поисках методов расчетной оценки сопротивляемости элементов стальных конструкций

хрупкому разрушению, и теоретически обоснована расчетная оценка критической температуры хрупкого разрушения элементов стальных конструкций с учетом масштабного фактора и их прочности с учетом хрупкого разрушения.

Согласно классической теории хрупкого разрушения, такое разрушение происходит в элементе с надрезами при условиях:

$$\bar{\sigma}_{1r} = K_i \bar{\sigma}_T = K_i \cdot \text{EXP}[qs(\bar{T} - T)] \cdot \bar{\sigma}_T = R_0 = \text{const.} \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{1r}$ - локальный предел текучести стали, R_0 - сопротивление отрыву стали, значение которого не меняется при снижении температуры, $K_i = \bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_i$ - коэффициент жесткости напряженного состояния, где $\bar{\sigma}_i$ - приведенное напряжение в теориях прочности. Значение K_i , согласно IV теории прочности и критерию Мизеса, определяется по формуле:

$$K_i = \bar{\sigma}_1 / \sqrt{2\sigma(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2} \cdot 1. \quad (6)$$

Учитывая формулу (2), получим:

$$K_i = (1+j) / \sqrt{m^2(4j^2+4j+1) - m(4j^2+4j+1) + (j^2+j+1)}. \quad (7)$$

Температуру, при которой впервые реализуется условие (5) и на границе между зонами упругого и пластического деформирования зарождается трещина хрупкого разрушения (см. рис. 2), можно назвать критической T_{cr} . Очевидно, что теоретически существует лишь одна критическая температура, при которой $K_i = K_{i\max}$ и на расстоянии от вершины надреза js_1 выполняется условие (5). Таким образом, при $T > T_{cr}$ реализуется вязкое разрушение, а при $T \leq T_{cr}$ разрушение будет хрупким, или вернее, квазихрупким, так как зарождению хрупкой трещины предшествует пластическое деформирование на глубине $js < js_1$. Вследствие этого при $T < T_{cr}$ необходимо проверить прочность заданного элемента с учетом хрупкого разрушения, а при этом необходимо установить расчетное значение T_{cr} .

Исходя из формулы (5) и учитывая постоянные значения R_0 , $\bar{\sigma}_T$ и qs для рассматриваемой стали, получим:

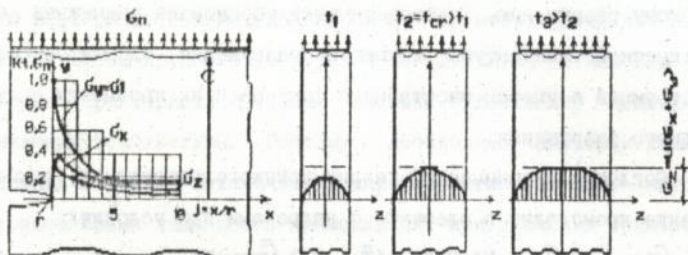


Рис. 1 Напряженное состояние в стальном элементе с надрезами.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Сталь	Сирия	шт.	T °C	σ_T МПа	$q_{\text{в}}$ 1/°C	$\sigma_{\text{в}}$ МПа	$q_{\text{в}}$ 1/°C	W %	δ_c %
ВСт3сп	1	3	+20	280,0		441,0		72,53	31,73
	2	3	-20	328,7	0,00405	487,3	0,00248	70,73	28,53
	3	3	-60	388,7		536,7		69,87	26,30
ВСт3сп -Т2	1	3	+20	308,7		474,3		67,67	26,40
	2	3	-20	357,3	0,00368	518,0	0,00216	67,40	24,37
	3	3	-60	414,3		561,7		66,84	22,10
09Г2С	1	3	+20	348,0		552,0		73,93	31,53
	2	3	-20	394,3	0,00306	593,3	0,00178	73,36	30,00
	3	3	-60	443,3		635,3		73,03	28,27

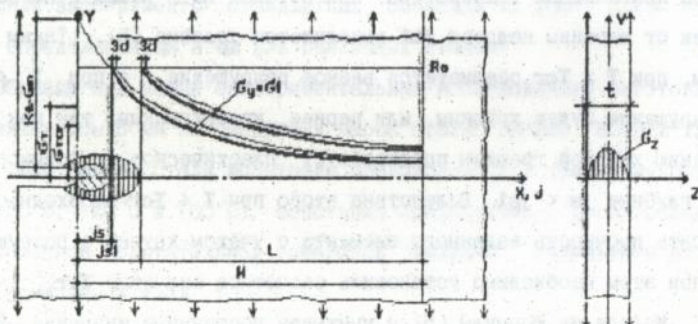


Рис. 2 Расчетная схема для оценки прочности элементов стальной конструкции с учетом крутильного разрушения.

$$T_{cr} = C + 1/q_s \cdot \ln(K_{i\max}), \quad (8)$$

где C - константа материала, достоверное значение которой в настоящее время определить весьма трудно в связи с отсутствием достаточных сведений о величине R_0 для малоуглеродистых и низколегированных сталей. Однако, при известном значении T_{cr} из экспериментов для рассматриваемого элемента с толщиной t' , можно достаточно обоснованно расчетными методами с учетом (8) определить T_{cr} для любой толщины t :

$$T_{cr} = T_{cr}' + 1/q_s \cdot \ln(K_{i\max}/K_{i\max}'), \quad (9)$$

где $K_{i\max}'$ - максимальное значение K_i при толщине элемента t' . Отметим, что T_{cr} определяется значением $K_{i\max}$ как основным показателем напряженного состояния.

Значение $K_{i\max}$ в принципе можно определить по формуле (7), однако эта формула достаточно сложна для теоретического его определения в зависимости от j и m . Поэтому мы проводили расчеты по этой формуле при различных значениях m (0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30) с помощью ЭВМ. Из полученных расчетных результатов нами построена зависимость K_i от j при различных m и отмечено следующее:

1) Для каждой m имеется максимальное значение $K_{i\max}$, которое находится на расстояниях от $1,0j$ до $9,0j$ (см. рис. 1).

2) Зависимость $K_{i\max}$ от m нами аппроксимирована формулой (коэффициент корреляции = 0,970):

$$K_{i\max} = 1/(1 - 2m) - 0,296m + 0,1547, \quad (10)$$

Учитывая формулу (3), нами построена зависимость $\ln(K_{i\max})$ от t/t_{cr} , показанная на рис. 3. Отмечено, что в пределах от $0,2t_{cr}$ до $1,0t_{cr}$, т.е. в пределах реальных толщин элементов стальных конструкций, эта зависимость очень близка к линейной, следовательно, при инженерных расчетах следует принять формулу (9) в упрощенном виде:

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

$$T_{cr} = T'_{cr} + D(t - t'), \quad (11)$$

где D - расчетный параметр, значение которого определяется:

$$D = 0,301/(qs \cdot tcr). \quad (12)$$

Учитывая результаты наших и других экспериментальных исследований, получены значения D для некоторых марок стали:

Сталь	BCr3кп	BCr3лс	BCr3сп	BCr3сп-T2	09Г2С
qs	0,0050	0,0045	0,0040	0,0037	0,0030
D	1,505	1,672	1,818	2,304	2,508

Нами установлена корреляционная зависимость T_{cr} , вычисленной по формуле (11), от $T_{cr. \text{экс}}$, полученной экспериментально многими исследователями, при этом коэффициент корреляции равен 0,985. Такой высокий коэффициент корреляции свидетельствует о достоверности предлагаемого нами метода.

Таким образом, рассматривая напряженное состояние при хрупком разрушении стали у острого надреза (см. рис. 2) при $T < T_{cr}$ и T_{cr} размеры зон пластической деформаций js и $js1$ и разрушающие напряжения σ_p и σ_{p1} , запишем основное расчетное тождество:

$$Kt \cdot \sigma_p \cdot F(js) = K_1 \cdot \text{EXP}[qs(\bar{T} - T)] \cdot \bar{\sigma}_T = R_0 = \text{const.}, \quad (13)$$

где $F(js) = (1 + js)/(1 + 2js)^{3/2}$ и $\bar{\sigma}_T$ - номинальное разрушающее напряжение. Следовательно, с некоторым запасом прочности расчетный коэффициент β в формуле (1) может быть принят равным отношению σ_p/σ_{p1} , т. е.

$$\beta = \sigma_p / \sigma_{p1} = F(js1)/F(js) \leq 1,0. \quad (14)$$

Значение $js1$ определяется при реализации плоской деформации ($t > tcr$), согласно теории пластичности, с использованием формулы:

$$K_1 = 1 + \text{LN}(1 + js) \leq 2,57, \quad (\text{при } js \leq 3,81). \quad (15)$$

Существенным недостатком метода НИСИ является распространение условия (15), которое справедливо только для плоской деформации ($n = 0,3$), на любые случаи, при которых $n < 0,3$.

Для устранения этого недостатка нами обоснована зависимость:

$$K_i = 1 + \text{LN}(1 + A \cdot m \cdot j_s) \leq K_{i\max}, \quad (16)$$

где A - расчетная константа. Учитывая формулу (15), получим:

$$j_s = 3f \text{EXP}(K_i - 1) - 11 / (10 \cdot m). \quad (17)$$

Обозначая другой расчетный параметр f , значение которого определяется формулой:

$$f = K_i / K_{i\max} - \text{EXP}[-q_s(T_{cr} - T)], \quad (18)$$

нами построена зависимость β от f (см. рис. 4), с помощью которой при известных значениях T_{cr} , q_s , t можно определить коэффициент β при расчетной низкой температуре $T \leq T_{cr}$.

На рис. 4 показано, что метод ЦНИИПСКА необоснованно дает заниженное значение из-за применения двух зависимых расчетных коэффициентов ($\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$); зависимость β от f по методу НИСИ при равной критической температуре является нижней границей предлагаемого нами метода; предлагаемый нами метод не только теоретически развивает и совершенствует методы ЦНИИПСКА и НИСИ, но и соответствует нормативному методу, обоснованному многочисленными экспериментальными исследованиями.

В шестой главе сформулированы основные выводы по результатам исследований, а также рекомендации и предложения по совершенствованию китайских норм.

На основании многочисленных теоретических и экспериментальных исследований по проблеме хрупкого разрушения стали и элементов стальных конструкций, а также приведенного анализа нормативных методов, нами разработан ряд рекомендаций и предложений по совершенствованию китайских норм, их всего 29. Среди них: 3 относятся к выбору марки стали; 8 - выбору конструктивной формы; 12 - изготовлению конструкций; 3 - транспортировке и монтажу конструкций; 2 - эксплуатации конструкций; и еще одна, конечно, о введении расчетной оценки прочности с учетом хрупкого разрушения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Некоторые требования, указания и рекомендации, приведенные в действующих нормах СНГ и КНР по повышению надежности элементов стальных конструкций с учетом их хрупкого разрушения, не являются эффективными и требуют совершенствования.

2. Действующие в инженерной практике расчетные методы по оценке прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения (нормативный метод, метод НИСИ и метод ЦНИИПСКа) имеют недостатки и противоречия требуют совершенствования и теоретического обоснования.

3. Теоретически доказано, что сложное напряженное состояние в элементах стальных конструкций существенно ограничивает развитие пластических деформаций при их растяжении, что способствует повышению вероятности хрупкого разрушения, а влияние масштабного фактора на сопротивляемость элемента хрупкому разрушению во многом определяется изменением напряженного состояния при увеличении толщины элемента с высоким уровнем концентрации напряжений.

4. Численным методом конечных элементов установлено, что плоская деформация при растяжении стальных элементов с острыми надрезами реализуется в срединной плоскости у вершины надреза при отношении толщины элемента к радиусу надреза $t/r = 80$, что соответствует ряду экспериментальных исследований. При этом установлена зависимость коэффициента степени реализации плоской деформации от толщины элемента.

5. При использовании элементов теорий концентрации напряжений, пластичности и классической теории хрупкого разрушения стали теоретически установлено, что критическая температура хрупкого разрушения элементов стальных конструкций с высоким уровнем концентрации напряжений линейно зависит от их толщины. Такое решение

позволяет оценивать критическую температуру элемента конструкции любой толщины при испытании образцов подобной конструктивной формы при одной толщине, что существенно уменьшает стоимость и трудоемкость лабораторных исследований при оценке критической температуры с учетом масштабного фактора. Этот вывод подтвержден корреляционным анализом многих экспериментальных исследований.

6. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили обосновать количественно оценку прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения, которая развивает и совершенствует действующие в инженерной практике расчетные методы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Сильвестров А. В., Ван Юньцин Расчетная оценка предельного состояния элементов стальных конструкций при их квазихрупком разрушении. Деп. в УкрИНТЭИ, 10.06.92, No. 867-ук92, 1992. -9с.
2. Ван Юньцин Анализ условий перехода из плоского напряженного состояния к плоской деформации в стальных растянутых пластинах с острыми надрезами при использовании метода конечных элементов. Деп. в УкрИНТЭИ, 09.03.93, No. 395-ук93, 1993. -9с.
3. Ван Юньцин Расчетная оценка критической температуры хрупкого разрушения элементов стальных конструкций с учетом масштабного фактора. Деп. в ГНТБ Украины, 30.03.93, No. 685-ук93, 1993. -15с.
4. Ван Юньцин Расчетная оценка прочности элементов стальных конструкций с учетом хрупкого разрушения. Деп. в ГНТБ Украины, 30.03.93, No. 686-ук93, 1993. -16с.

ВАН ЮНЦІН

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З
УРАХУВАННЯМ КРИЖКОГО РУЙНУВАННЯ

Здано до набору 30.04.93. Підписано до друку 30.04.93. Формат
60x84/16. Папір друкарський. Офсетний друк. Умовн. друк. арк.
1,16. Умовн. фарб. відб. 1,16. Тираж 120. Замовлення № 61.
Замовлене. Безкоштовно.
Видавничо-поліграфічне орендне підприємство "Дніпро".
ВПОП "Дніпро" 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.

465634

4-27563
AB 27.563