

ГОССТРОЙ СССР

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ПО СТРОИТЕЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
ПРЕДПРИЯТИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

ЦНИИПроектстальконструкция

# МАТЕРИАЛЫ ПО МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КОНСТРУКЦИЯМ

Выпуск 16

*Под редакцией д-ра техн. наук проф. Н. П. Мельникова*

ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

Инд. № \_\_\_\_\_

83



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ  
Москва — 1972

*Д-р техн. наук проф. Н. П. МЕЛЬНИКОВ,  
кандидаты техн. наук О. Н. ВИНКЛЕР, Н. А. МАХУТОВ*

## УСЛОВИЯ И ПРИЧИНЫ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Хрупкие разрушения стальных конструкций наносят большой ущерб народному хозяйству. Поэтому вопрос повышения сопротивления конструкций хрупкому разрушению в настоящее время является весьма актуальным.

Возникновение хрупких разрушений в элементах строительных металлоконструкций обусловлено воздействием ряда факторов технологического, конструктивного и эксплуатационного характера. В связи с этими факторами анализ причин хрупких разрушений представляет большой интерес [3,5]. Ниже приводятся некоторые результаты исследования основных причин и условий хрупких разрушений строительных металлоконструкций.

**Распределение числа хрупких разрушений конструкций по годам.** Соответствующие данные о распределении числа хрупких разрушений различных типов конструкций по годам представлены на рис. 1. Вероятность определялась из соотношения

$$P = \frac{m - 0,5}{n} 100\%,$$

где  $m$  — порядковый номер данного разрушения;  $n$  — общее число разрушений конструкций данного типа.

Из данных рис. 1 видно, что распределение числа хрупких разрушений по годам в значительной степени зависит от типа конструкций. При вероятностях до 50% кривая распределения разрушений мостов расположена по годам существенно левее, чем соответствующие кривые для судов, резервуаров и строительных конструкций. Это объясняется, по-видимому, главным образом тем, что при строительстве крупных стальных мостов раньше, чем при изготовлении других конструкций, была широко применена сварка. В результате анализа причин хрупких разрушений мостов и широкого круга исследований осуществлен ряд мероприятий по повышению надежности сварных мостовых конструкций. Это позволило резко снизить число хрупких разрушений стальных мостов.

Переход в годы мировой войны к цельносварным судовым конструкциям при отсутствии опыта их изготовления и эксплуатации явился одной из основных причин массовых хрупких разрушений. С 1942 по 1946 г. было зарегистрировано около 108 крупных аварий судов. Более чем в 900 корпусах судов были отмечены хрупкие трещины длиной 200—500 мм и более. Проведение фундаментальных исследований, разработка и внедрение более качественных свариваемых сталей, совершенствование технологии сварки и методов контроля сварных соединений позволили уже в начале 50-х годов резко снизить число хрупких разрушений судов. Вместе с тем, как видно из приведенных на рис. 1 данных, проблема хрупкого разрушения судов к настоящему времени полностью не решена. Это связано с непрерывным увеличением абсолютных размеров сечений элементов кон-

струкций и повышением роли циклических нагрузок, создающих очаги хрупкого разрушения в виде трещин усталости.

Создание крупных сварных резервуаров, газгольдеров, воздухонагревателей для доменных печей также было связано с большим числом хрупких разрушений. Эти разрушения происходили при отсутствии внешних нагрузок, при эксплуатации на расчетных нагрузках, а также при испытаниях давлением.

Исследования показали, что хрупкие трещины часто начинаются от дефектов сварки, находящихся в зонах сопряжения корпуса с днищем. Так, по данным Анучкина [1], число хрупких трещин, возникающих в этих зонах, составляет около 56% общего числа трещин в резервуаре. При этом около 50% трещин были в сварных швах и в околошовных зонах и около 25% — в основном металле. Вместе с тем в целом ряде случаев, как показали контрольные испытания, корпуса резервуаров изготавливались из стали с низкой сопротивляемостью хрупкому разрушению. Сопоставление результатов испытаний на ударную вязкость металла хрупко разрушившихся резервуаров (при температуре разрушения) и металла с повышенной сопротивляемостью хрупкому разрушению позволило, например в США, сформулировать нормативные требования к качеству резервуарных сталей. Одним из этих требований было получение при разрушении стандартных ударных образцов 70% волокнистой поверхности излома при температуре, равной минимальной в эксплуатации.

Широкое применение для оценки способности основного металла и сварных соединений сосудов сопротивляться распространению хрупких трещин нашли испытания по методу Робертсона, Иошики — Каназава и др.

Повышение требований к выбору металла, технологии сварки и дефектоскопическому контролю в сочетании с улучшением конструктивной формы и технологии изготовления привело к существенному снижению числа хрупких разрушений резервуаров начиная с 1956—1958 гг.

Интенсивное освоение районов Сибири и Крайнего Севера потребовало значительного расширения в них промышленного строительства. Использование для этих районов с суровыми климатическими условиями методов конструирования, изготовления и монтажа строительных конструкций, проверенных многолетней практикой эксплуатации в условиях умеренных температур, привело к тому, что начиная с 1950—1954 гг. было отмечено большое количество хрупких аварий промышленных сооружений.

Важным обстоятельством является то, что число разрушений увеличивалось из года в год (рис. 2).

В связи с большим экономическим ущербом, связанным с хрупким разрушением конструкций, в СССР была принята широкая программа исследований причин хрупких разрушений и изыскания эффективных мероприятий по предотвращению этих разрушений. В результате этой работы в настоящее время осуществляется целый ряд мероприятий, которые безусловно позволяют существенно повысить надежность металлических конструкций против хрупких разрушений.

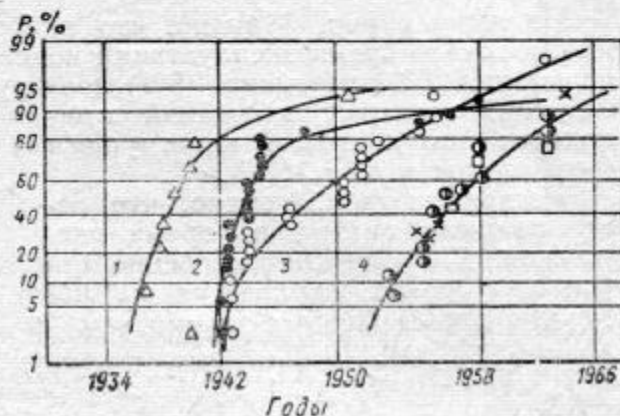


Рис. 1. Распределение накопленной частоты разрушения конструкции по годам  
1 — мосты; 2 — суда; 3 — резервуары; 4 — строительные конструкции

Анализ обстоятельств разрушений стальных строительных конструкций. Ниже приводятся результаты анализа обстоятельств 81 аварии строительных конструкций, происшедших с 1950 по 1967 г.

Таблица 1

Вид конструкций	Покрытия промышленных зданий	Листовые конструкции	Радиомачты, опоры ЛЭП	Эстакады, галереи
Число аварий (из 81)	30 (37%)	22 (27%)	19 (24%)	10 (12%)

Из данных рис. 3 видно, что наибольшее число аварий — 51 (63%) произошло во время эксплуатации конструкций. Минимальное — во время испытания (9%) и ремонта (5%) конструкций. Все число разрушений конструкций во время испытаний приходится на листовые конструкции (резервуары и т. п.).

Из данных табл. 1 видно, что основное число аварий во время эксплуатации конструкций, особенно при больших сроках, приходится на покрытия промышленных зданий.

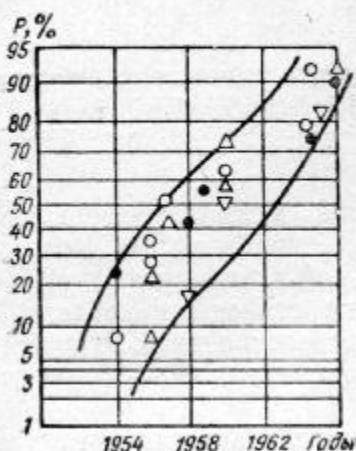


Рис. 2. Кривые распределения вероятности разрушения по годам для строительных конструкций

● — балки; △ — фермы; ▽ — эстакады; ○ — опоры ЛЭП

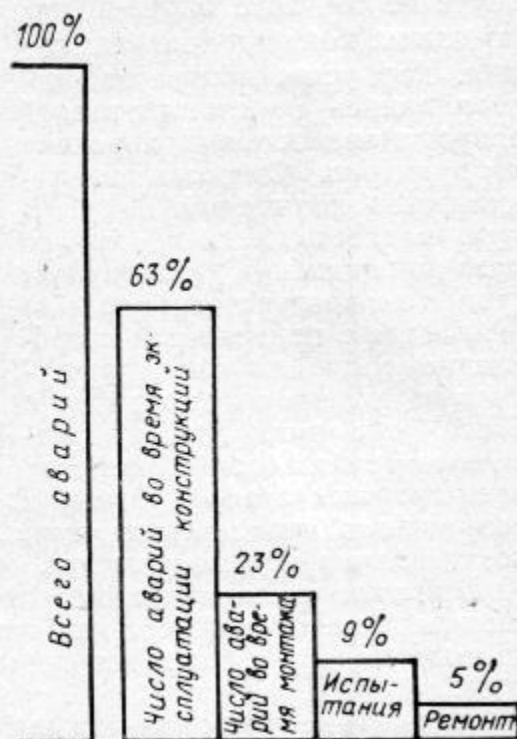


Рис. 3. Зависимость относительного числа разрушений от стадии эксплуатации

**Температурные условия хрупких разрушений.** Анализ нескольких десятков хрупких разрушений показывает, что возникновение хрупких трещин в конструкциях происходило при температурах эксплуатации, близких к минимальным. Распределение числа хрупких разрушений по месяцам года, представленное на рис. 4, зависит от вида конструкций и условий их нагружения. Наибольшее число разрушений резервуаров, перекрытий, транспортных эстакад, мостов приходится на зимние месяцы с отрицательными среднемесячными температурами.

Распределение хрупких разрушений по температурам представлено на рис. 5. Кривые распределений для всех конструкций имеют усечения слева (что связано с максимально возможными температурами хрупких разрушений) и усечения справа (что связано с минимально возможными температурами эксплуатации конструкций).

Сравнение кривых распределения разрушений по температурам показывает, что для вероятностей разрушения 5—90% температурный интервал хрупких разрушений для различных видов строительных конструкций не превышает 10—15°. При этом минимальная разница между температурами приходится на вероятность 50%. Для всех указанных на рис. 5 видов конструкций можно определить уровень максимальных температур (от -5 до +10° С), выше которых хрупкие разрушения обычно не наблюдались.

Представляет интерес сравнение кривых распределения вероятности хрупких разрушений по месяцам года различных строительных конструкций, для которых характерны статические нагрузки (см. рис. 4), с аналогичной прямой для рукоятей ковшей экскаваторов (рис. 6), построенной по данным [2] за 7 лет.

Большое число разрушений рукоятей ковшей приходится не только на зимние месяцы. Это указывает на то, что при возникновении хрупких состояний наряду с ролью температурного фактора большое значение имеет характер нагружения конструкции.

Распределение температур разрушения для различных типов конструкций представлено на рис. 7. Из этих данных видно, что строительные конструкции разрушались при наиболее низких температурах, а судовые — при наиболее высоких.

Для вероятности разрушения 50% указанная разница температур разрушения достигает 40°. Для вероятностей разрушения больше 95% эта разница уменьшается до 20°.

Диапазон температур хрупких разрушений строительных конструкций составляет 50° (от -50 до 0° С), а диапазон температур разрушения судов 35° (от -15 до +20° С). Это объясняется, во-первых, различием в уровнях температур эксплуатации и, во-вторых, существенной ролью масштабного фактора.

Хрупкие разрушения резервуаров и сосудов давления происходили при температурах, примерно на 10° более высоких, чем строительных конструкций. Эта разница также может быть объяснена ролью абсолютных размеров.

Разрушения мостов в основном наблюдались при минимальных температурах (от -35 до -10° С), хотя минимальные температуры эксплуатации мостов в настоящее время могут быть значительно ниже -35° С.

Наиболее широким (65°) оказался интервал температур, при которых наблюдались хрупкие разрушения экскаваторов: от -45 до +20° С (см. рис. 7, кривая 5). Одной из основных причин таких температурных условий разрушения экскаваторов является возможность перехода трещин усталости в хрупкие на разных стадиях их развития. При этом, как видно на рис. 7, кривая распределения вероятности температур разрушения для экскаваторов (кривая 5) не имеет выраженного правого порога, т. е. разрушения могут происходить и при более высоких температурах.

Кривые распределения температур разрушения для некоторых основных групп строительных конструкций (рис. 8) показывают, что эти температуры для вероятностей разрушения 5—90% отличаются друг от друга не более чем на 10—15°. Более низкими оказываются температуры для конструкций, в которых основными являются напряжения сжатия (опоры ЛЭП, элементы радиомачт и др.). Более высокими оказались температуры разрушения у элементов эстакад, галерей, подкрановых балок. Для всех указанных групп строительных конструкций имеется определенный уровень максимальных температур (от -25 до +10° С), выше которых хрупкие разрушения практически не происходят.

Важно отметить, что связь между среднемесячными температурами и числом разрушений менее устойчивая, чем между температурами в момент разрушений и числом разрушений. Это видно из данных рис. 9, где пред-

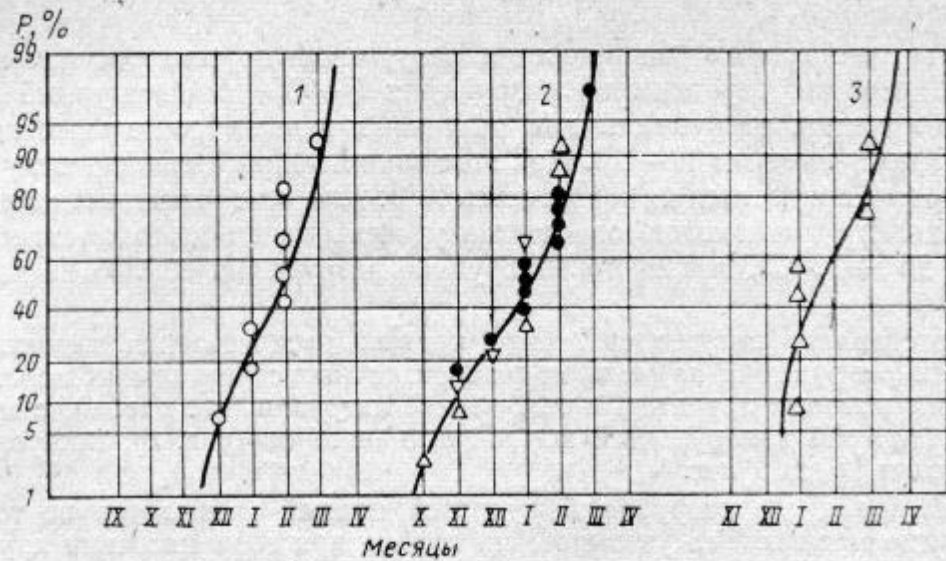


Рис. 4. Распределение накопленных частот разрушения по месяцам года  
1 — резервуары; 2 — строительные конструкции; 3 — мосты

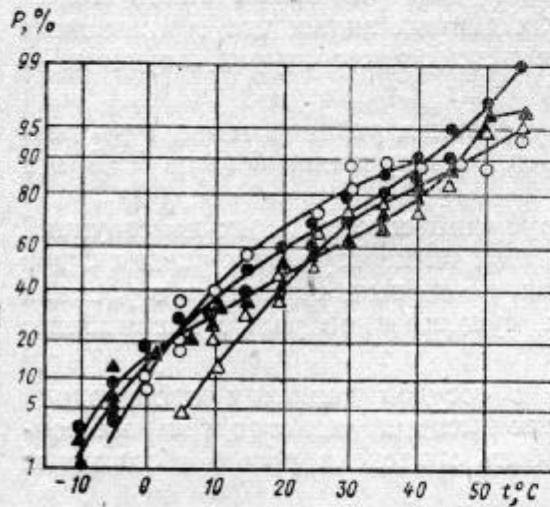


Рис. 5. Зависимость вероятности разрушения от температуры эксплуатации  
● — для общего числа аварии; ▲ — для покрытий промышленных зданий; ○ — для резервуаров; △ — для опор радиомачт

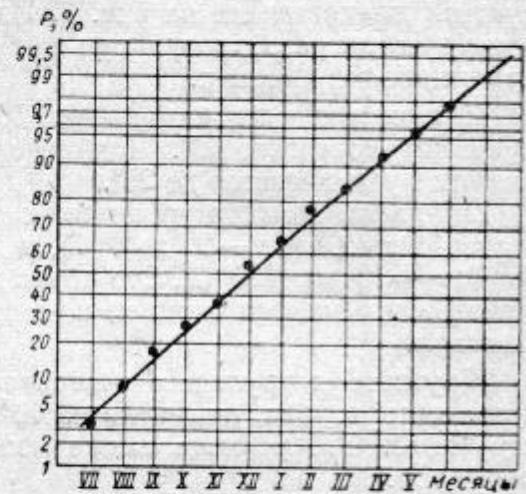


Рис. 6. Распределение вероятности разрушения рукоятей ковша экскаватора по месяцам года

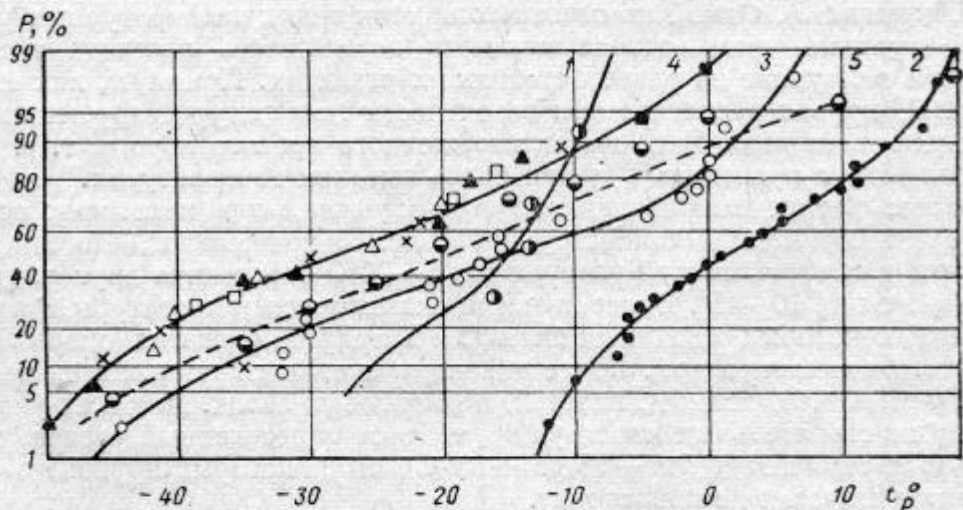


Рис. 7. Влияние температуры эксплуатации на накопленную частоту разрушения  
1 — мосты; 2 — суда; 3 — резервуары; 4 — строительные конструкции; 5 — экскаваторы

ставлена зависимость относительного числа поломок балок рукоятей ковшев экскаваторов от среднемесячных температур.

Таким образом, проектирование, изготовление и эксплуатация конструкций в районах с пониженными температурами требуют учета увеличения возможности их хрупкого разрушения и, следовательно, принятия соответствующих конструктивных и технологических решений, обеспечивающих повышение сопротивления хрупкому разрушению.

**Напряженность конструкций при хрупких разрушениях.** Хрупкие разрушения корпусов судов и мостов происходили при номинальных напряжениях, не превышающих 10—12 кгс/мм<sup>2</sup>. Как видно из данных рис. 10, около 20% разрушившихся резервуаров и сосудов давления в момент

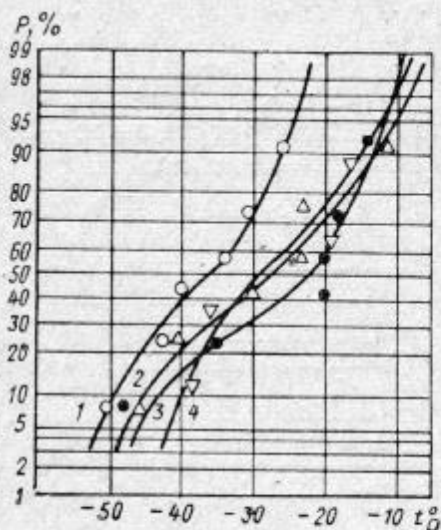


Рис. 8. Связь между температурой эксплуатации и накопленной частотой разрушения различных строительных конструкций  
1 — опоры ЛЭП; 2 — фермы; 3 — балки; 4 — эстакады

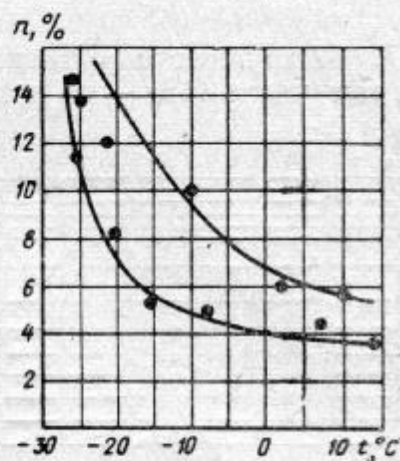


Рис. 9. Зависимость частоты разрушения рукоятей ковша экскаваторов от среднемесячной температуры

разрушения были практически не нагружены внешними эксплуатационными усилиями (за исключением усилий от собственного веса). При вероятности разрушения 50% номинальные напряжения в стенках резервуаров и сосудов давления не превышали 0,5—0,6 расчетных. Номинальные разрушающие напряжения от внешних нагрузок в элементах строительных конструкций составляли от 0,2 до 1 расчетных. При 50% вероятности разрушения эти напряжения были не более 0,8. При этом функция распределения разрушающих напряжений для резервуаров имеет явно выраженное ограничение слева, а для строительных конструкций — справа. Это объясняется более высоким уровнем остаточной напряженности в стенках резервуаров и сосудов давления, эффект которой может проявиться при самом незначительном повышении напряжений от внешних нагрузок.

Зависимость вероятности разрушения от уровня номинальных разрушающих напряжений представлена на рис. 11. Видно, что для заданной вероятности разрушения номинальные разрушающие напряжения в зависимости от групп конструкций изменяются на 20—40% расчетных. При этом более низкими оказываются номинальные напряжения крупногабаритных балок, подвергающихся воздействию циклических нагрузок.

Таким образом, номинальные разрушающие напряжения конструкций в хрупких состояниях могут быть весьма низкими. Это указывает на возможность хрупких разрушений конструкций на любой стадии изготовления, монтажа и эксплуатации.

**Механические свойства стали разрушившихся конструкций.** Установлено, что в большинстве случаев хрупко разрушившиеся строительные

конструкции были изготовлены из малоуглеродистой кипящей стали марки Ст. 3кп.

Распределение 57 хрупких разрушений строительных конструкций, изготовленных из стали марки Ст. 3, по характеру основной причины выглядит следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Основная причина разрушения	Число случаев	Процент от общего числа разрушения
Низкое качество металла . . . . .	26	46
То же, сварки . . . . .	10	17
Неудачное конструктивное решение . . . . .	17	30
Нарушение технологии эксплуатации, испытания, ремонта . . . . .	4	7

Из 57 хрупких разрушений 36 произошло при температуре выше  $-20^{\circ}\text{C}$ , и в том числе 44% — по причине низкого качества металла.

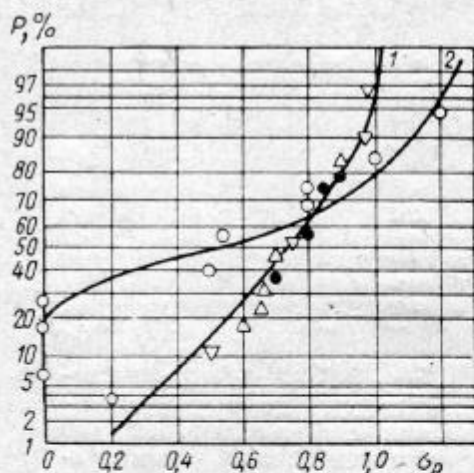


Рис. 10. Вероятность разрушения конструкций в связи с уровнем напряжений  
1 — строительные конструкции; 2 — резервуары

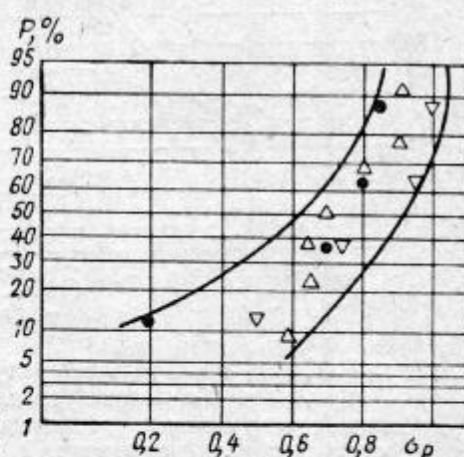


Рис. 11. Распределение вероятности разрушения строительных конструкций в зависимости от действующих напряжений  
● — балки; Δ — эстакады; ▽ — фермы

Исследование металла разрушившихся конструкций показало, что в ряде случаев для стали марки Ст. 3 наблюдались отклонения от ГОСТ 380—60\* по содержанию углерода (до 0,4%), серы (до 0,1%), фосфора (до 0,081%). В разрушившихся элементах конструкций были обна-

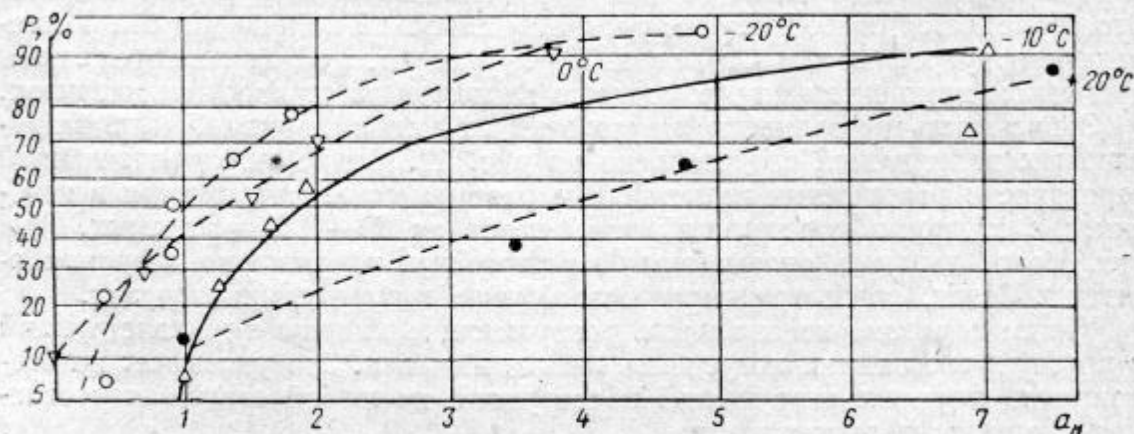


Рис. 12. Кривые распределения ударной вязкости в зависимости от температуры испытания



ружены также дефекты прокатки, повышенное содержание неметаллических включений и их неравномерное распределение по сечению проката, поры, расслоения и т. п.

Прочностные характеристики стали практически часто удовлетворяли требованиям ГОСТ.

Испытания стандартных образцов, вырезанных из зон зарождения хрупкого разрушения, показали, что металл обладает низкой ударной вязкостью. На рис. 12 видно, что отклонение значений ударной вязкости от норм для температуры  $+20^{\circ}\text{C}$  наблюдается при 85% вероятности разрушения и для  $-20^{\circ}\text{C}$  при 90%.

На рис. 13 показаны значения ударной вязкости металла разрушившихся конструкций, полученные при тех температурах, при которых произошли разрушения. Из этих данных видно, что ударная вязкость стали при температурах  $-20$  и  $-40^{\circ}\text{C}$  в большинстве случаев была в пределах от 0,3 до 2  $\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ . Следует отметить, что при  $20^{\circ}\text{C}$  ударная вязкость в некоторых случаях достигала значений до 10—13  $\text{кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ .

**Влияние толщины проката.** Если толщину проката разрушившихся конструкций разделить на две группы применительно к ГОСТ 380—60\*, то получится следующее распределение числа аварий в зависимости от толщины элементов (табл. 3).

Кривые распределения числа аварий по толщине проката, представленные на рис. 14, имеют усечения в связи с ограничением толщины проката, применяемого в конструкциях. Выраженное усечение кривых слева объясняется отсутствием высоконагруженных тонких элементов конструкций и низкими значениями критических температур для малых толщин.

Большее число аварий конструкций с толщиной элементов до 20 мм, а также увеличение вероятности разрушения для толщин 10—20 мм связано с наибольшим применением проката этих толщин в промышленном строительстве.

**Роль абсолютных размеров конструкций при хрупком разрушении.** Вероятность хрупких разрушений конструкций, как известно, увеличивается по мере увеличения их абсолютных размеров.

Так, например, число хрупких разрушений судов увеличивалось с увеличением их грузоподъемности и, следовательно, толщины стенок корпусов. Наглядно роль масштабного фактора при хрупком разрушении была выявлена при анализе зависимости температуры разрушения резервуаров от их объема (рис. 15). При увеличении объема резервуаров от 1 до 2 тыс.  $\text{м}^3$  средние температуры разрушения повышаются примерно на  $30^{\circ}$  (от  $-30$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ). Аналогичные, но менее систематические данные получаются при анализе хрупких разрушений других строительных конструкций (покрытий промышленных зданий и эстакад).

**Время эксплуатации конструкций до момента хрупкого разрушения.** Нестационарность нагружения конструкций в эксплуатации, а также накопление повреждений от длительного стати-

Таблица 3

Толщина проката в элементах конструкций в мм	Число аварий
4—20	35
20—40	19

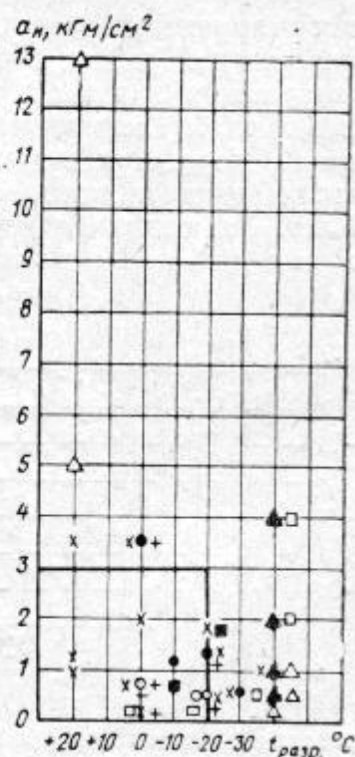


Рис. 13. Зависимость ударной вязкости от температуры испытаний

Δ — 10 мм; □ — 16 мм; ○ — 18 мм;  
× — 20 мм; + — 22 мм; ● — 24 мм;  
○ — 30 мм; Δ — 32 мм;  
■ — 36 мм

ческого и циклического нагружения и от коррозии повышает вероятность хрупких разрушений. Продолжительность периода эксплуатации до возникновения хрупкого разрушения существенно зависит от вида конструкций и условий их работы. Так, например (рис. 16), большое число хруп-

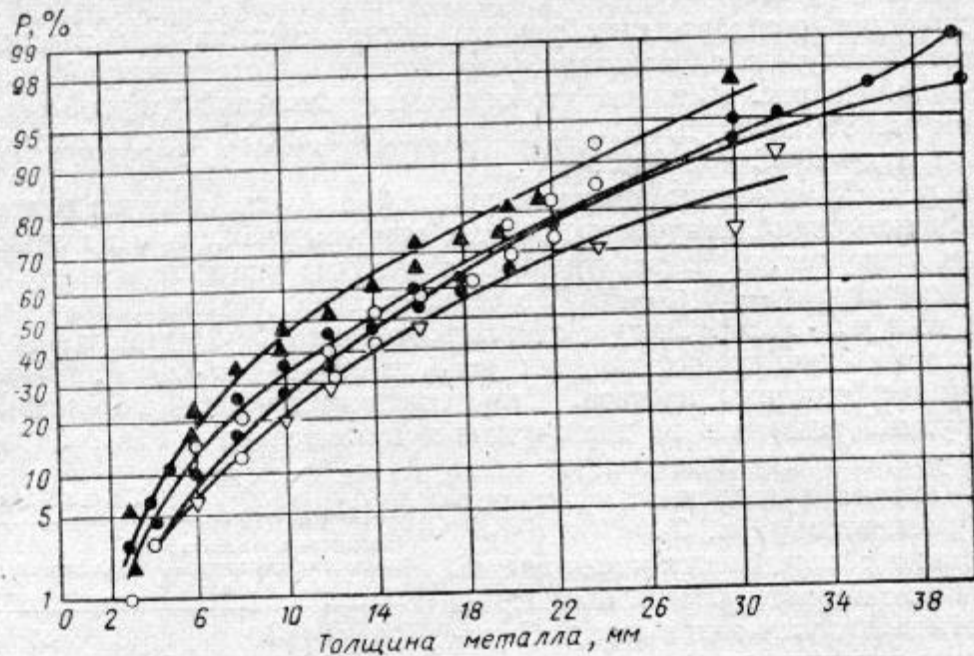


Рис. 14. Влияние абсолютных размеров сечений элементов конструкций на накопленную частоту разрушений  
 ● — для общего числа аварий; ▲ — для покрытий промышленных зданий; ○ — для резервуаров; ▽ — для эстакад и галерей

ких разрушений резервуаров и сосудов давления (до 40%) происходит в начальной стадии эксплуатации. Кривая 1 распределения вероятности разрушения в зависимости от длительности эксплуатации резервуаров имеет слабо выраженный правый порог при длительности эксплуатации 5—6 лет. Это свидетельствует о том, что после указан-

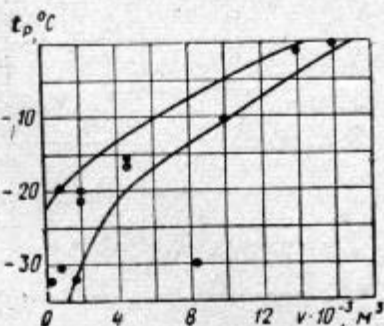


Рис. 15. Связь между объемом резервуаров и температурой их разрушения

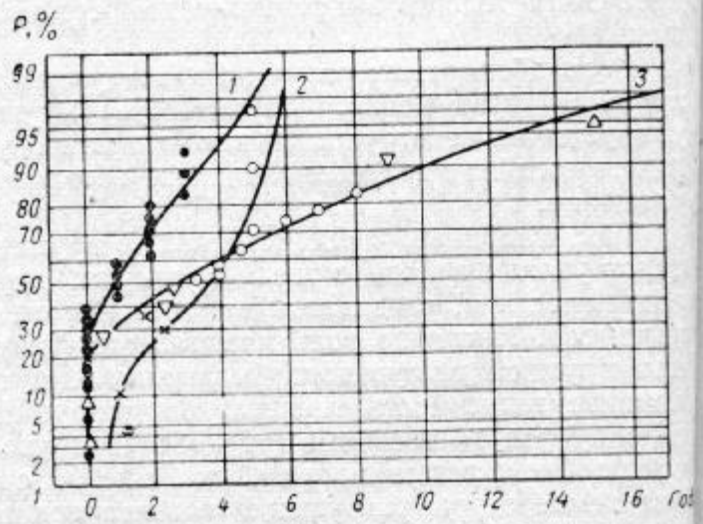


Рис. 16. Зависимость вероятности разрушения от срока эксплуатации  
 1 — резервуары; 2 — мосты; 3 — строительные конструкции

ного срока эксплуатации вероятность хрупкого разрушения резервуаров заметно сокращается. Аналогичный вид, но с менее выраженным порогом слева имеет кривая 2 распределения разрушений мостов. Важно отметить, что применительно к строительным конструкциям перекрытий

зданий, галерей балок число хрупких разрушений на начальных стадиях эксплуатации примерно вдвое меньше, чем число разрушений резервуаров. Вместе с тем функция распределения числа разрушений этих строительных конструкций (кривая 3) не имеет усечения справа, что указывает на возможность хрупкого разрушения после достаточно длительного срока эксплуатации (более 8—10 лет).

Длительность безаварийной работы строительных конструкций зависит от их типа и от условий эксплуатации (рис. 17). Наиболее выраженную зависимость вероятности разрушения от длительности эксплуатации имеют элементы башенных кранов при длительности эксплуатации от

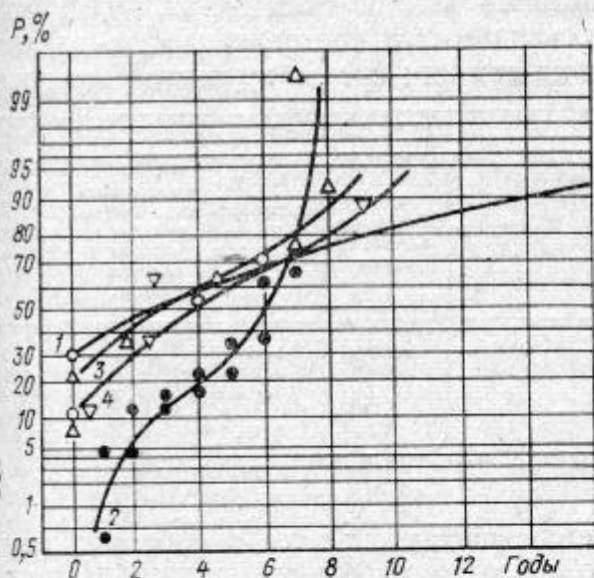


Рис. 17. Изменение накопленной частоты разрушения с увеличением срока эксплуатации строительных конструкций  
1—балки; колонны; 2—башенные краны; 3—фермы покрытий; 4—эстакады

1 года до 7—8 лет. Более пологими оказываются функции распределения числа разрушений ферм покрытий, эстакад и подкрановых балок. У этих конструкций происходит более медленное накопление повреждений, чем у башенных кранов. Кроме того, для ферм, эстакад и



Рис. 18. Зависимость относительного числа разрушений от конструктивных технологических и эксплуатационных факторов

1—дефекты сварки; 2—конструктивные дефекты; 3—усталостные трещины

подкрановых балок более существенным оказывается начальный период эксплуатации (до года), когда вероятность хрупких разрушений может достигать 30%. Возможность разрушений строительных конструкций после длительной эксплуатации связана также с тем, что при увеличении срока работы увеличивается вероятность одновременного сочетания ряда факторов, способствующих возникновению хрупких трещин (минимальные температуры, ветровые и снеговые перегрузки и др.).

**Роль технологических и конструктивных дефектов при хрупком разрушении.** Технологические дефекты, и в первую очередь дефекты сварки, а также дефекты конструктивного характера, играют особо важную роль при возникновении хрупких состояний.

Как видно из данных рис. 18, для судов основной причиной хрупкого разрушения было неудовлетворительное конструктивное решение усиления в местах сварки люков, а также в местах примыкания продольных и поперечных связей к корпусу. Менее чем в 20% случаев от общего числа аварий в качестве основной причины были горячие и холодные трещины от сварки. Для 10% аварийных судов в качестве основной причины разрушения признавались предварительно возникшие трещины усталости.

Значительное перераспределение доли конструктивных и технологических дефектов видно при переходе от судовых конструкций к резервуа-

рам и конструкциям промышленных зданий и сооружений. Примерно в 60—66% разрушений этих конструкций важную роль играли дефекты сварки — трещины, непровары, подрезы и т. д. В 20—25% общего числа разрушений явной причиной разрушения признавалось неудовлетворительное конструктивное решение: высокая концентрация напряжений при недостаточных зазорах между сопрягаемыми элементами, наличие пересечений нескольких сварных швов в зонах повышенной концентрации напряжений, местные усиления, создающие высокую концентрацию напряжений, и т. д.

В 10% случаев хрупкого разрушения строительных конструкций хрупкие трещины начинали свое развитие от трещин усталости.

Неудовлетворительная технология изготовления металлоконструкций и отсутствие должного дефектоскопического контроля нередко являются причиной резкого снижения их надежности против хрупкого разрушения.

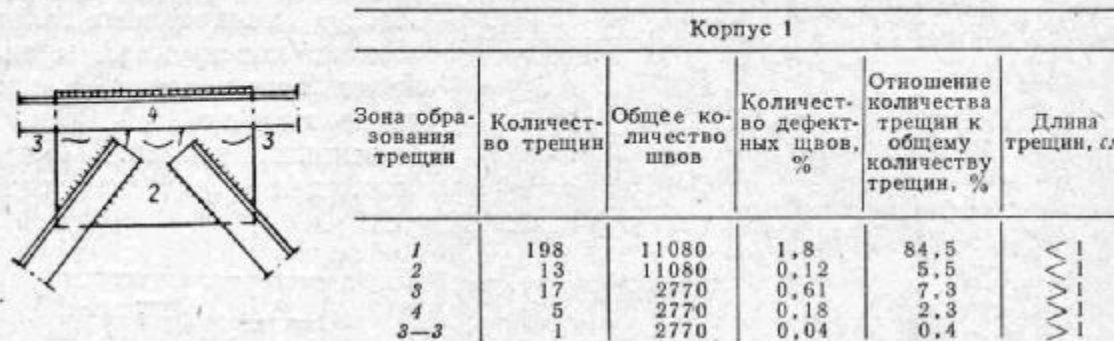


Рис. 19. Характеристика дефектов в элементах ферм

Так, например, на одном из строившихся объектов в фасонках смонтированных ферм покрытия было обнаружено большое количество трещин образовавшихся в процессе изготовления ферм и их монтажа. Всего было обследовано 20 737 узлов верхнего и нижнего поясов ферм, из них 1151 был дефектным (около 55%). Подавляющее число трещин (75—90% общего числа) имели длину до 10 мм. Обычно эти трещины возникали около сварных швов (рис. 19). В ряде узлов были обнаружены трещины длиной более 10 мм, достигавшие иногда 200—300 мм.

Кроме указанных дефектов было обнаружено более 500 погнутостей элементов ферм, размер которых превышал 10 мм. Причем среди них было более 2% погнутостей, достигающих 50—60 мм. Таким погнутостям могут соответствовать местные пластические деформации величиной до 4—5%. Образование такой пластической деформации и последующего старения металла, как известно, существенно увеличивает вероятность хрупкого разрушения.

Для приближенной оценки вероятности хрупкого разрушения элементов конструкций можно использовать данные [4] лабораторных испытаний образцов, имеющих различные уровни концентрации напряжений и остаточные напряжения от сварки. На рис. 20 и 21 показаны кривые распределения номинальных разрушающих напряжений для стали Ст. 3сп в диапазонах температур от +20 до -20° С и от -40 до -60° С соответственно. Испытанию подвергались образцы толщиной от 8 до 20 мм. Образцы имели ширину около 120 мм. При этом часть образцов не имела концентрации напряжений (гладкие), часть образцов имела лобовые и фланговые швы без макродефектов (сварные). Испытанию подвергались также образцы из основного металла с высокой концентрацией напряжений (острый надрез), образцы сварные с приваренными составными ребрами, имитировавшими дефектные сварные соединения, и образцы с усталостными трещинами глубиной от 10 до 20—30 мм. При температурах выше -20° С распределение разрушающих напряжений для всех образцов оказывается близким к нормальному.

При вероятности разрушения более 0,2—0,5% номинальные разрушающие напряжения оказываются выше предела текучести стали  $\sigma_{0,2}$ .

Исключение составляют образцы с трещинами, для которых в области малых (менее 1—2%) вероятностей разрушения сопротивление разрушению может быть ниже предела текучести. При температурах в пределах от  $-60$  до  $-40^\circ\text{C}$  бездефектные образцы из основного металла и сварные разрушаются при больших напряжениях, чем при температурах от  $-20$

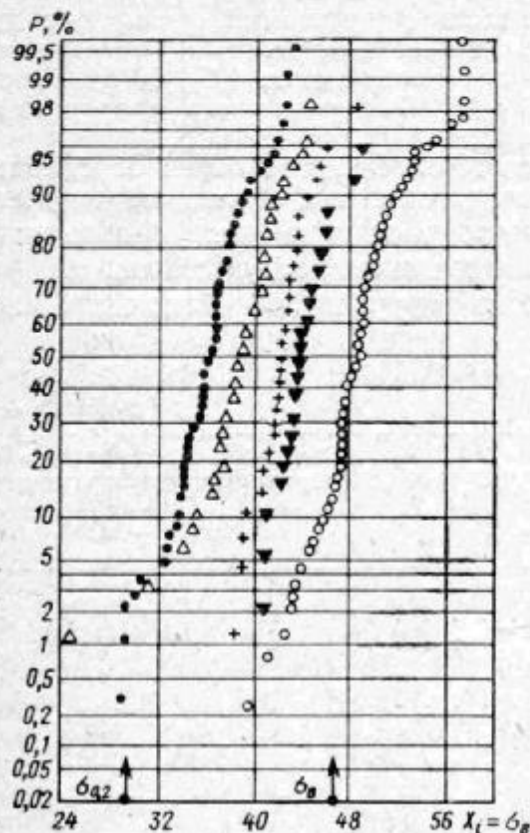


Рис. 20. Кривые распределения вероятности разрушения крупноразмерных образцов при температурах от  $+20$  до  $-20^\circ\text{C}$  (сталь марки Ст. 3 сп, число образцов  $n = 48 \div 159$ )

○ — гладкий; ● — с острым надрезом; Δ — с трещинами усталости; + — с приваренным составным ребром; ▼ — сварной с накладками

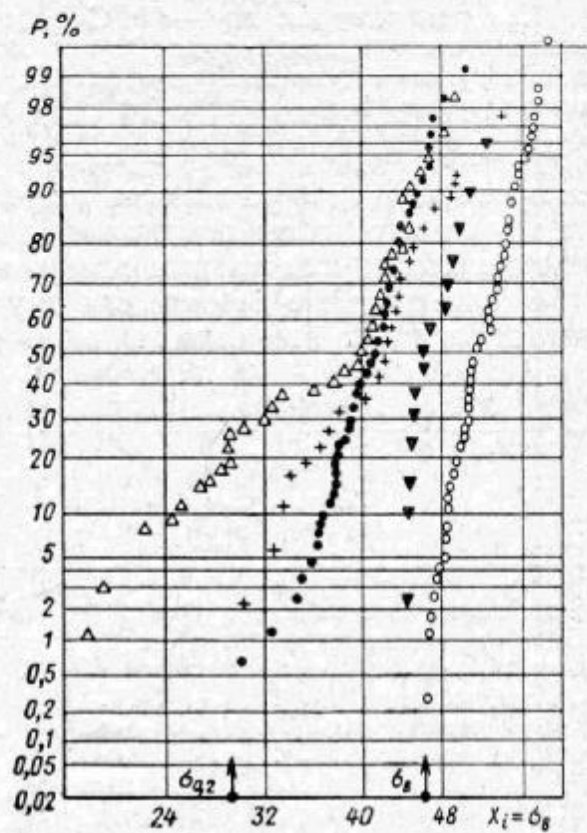


Рис. 21. Кривые распределения вероятности разрушения крупноразмерных образцов при температурах от  $-40$  до  $-60^\circ\text{C}$  (сталь марки Ст. 3 сп, число образцов  $n = 22 \div 131$ )

до  $20^\circ\text{C}$ . Однако сопротивление разрушению образцов с высокой концентрацией напряжений (с трещиной и сварные с ребром) оказывается существенно ниже.

В соответствии с данными рис. 20 и 21 вероятность разрушения оказывается наиболее высокой при низких температурах в элементах с исходными дефектами типа трещин. Обнаруженные в фермах трещины даже при ограниченных размерах (до 20—30 мм) могут вызвать резкое уменьшение прочности при низких температурах в условиях статического нагружения при удовлетворительных механических свойствах стали.

Результаты обследования изготовленных и частично смонтированных ферм одного из промышленных зданий показали, что наибольшее число дефектов типа трещин сконцентрировано в фасонках в зонах сварных швов.

Длина обнаруженных трещин достигает в ряде случаев 100—150 мм. В хрупких состояниях (при напряжениях, меньших предела текучести) разрушающие напряжения для таких размеров трещин могут оказаться в 1,5—2 раза ниже, чем показано на рис. 20 и 21. Такие трещины в растя-

гибаемых зонах фасонки являются недопустимыми и должны быть устранены.

Полагая в соответствии с результатами экспериментов и расчетов, что наибольшие растягивающие местные напряжения в фасонках могут достигать  $23 \text{ кгс/мм}^2$ , возможность разрушения бездефектных фасонки при расчетных нагрузках (в зонах сварных швов и вне их) как при температурах до  $-20^\circ \text{C}$ , так и при температурах от  $-40$  до  $-60^\circ \text{C}$ , практически исключена.

При температурах до  $-20^\circ \text{C}$  вероятность разрушения фасонки с дефектами протяженностью до  $20-30 \text{ мм}$  в зонах наибольших растягивающих напряжений, по данным рис. 20, оказывается менее  $0,5-0,75\%$ . При температурах более низких (от  $-40$  до  $-60^\circ \text{C}$ ) вероятность разрушения фасонки дефектами увеличивается примерно в 10 раз.

При этих оценках не учитываются остаточные напряжения от сварки, которые существенно снижаются при предварительном образовании дефектов; кроме того, зоны высоких остаточных растягивающих напряжений от сварки обычно сопоставимы с толщинами свариваемых элементов.

Сводные данные о вероятности хрупкого разрушения фасонки при расчетных нагрузках приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика фасонки	Вероятность разрушения в	
	температура от $+20$ до $-20^\circ \text{C}$	температура от $-40$ до $-60^\circ \text{C}$
Бездефектные фасонки вне зон сварных швов . . . . .	0	0
Бездефектные фасонки в зонах сварных швов . . . . .	0	0
Фасонки, имеющие трещины длиной $10-30 \text{ мм}$ :		
в зоне поясов . . . . .	0,5	8
»  »  стоек . . . . .	$<0,1$	$<0,3$
»  »  раскосов . . . . .	$<0,02$	$<0,02$

При снижении нагрузок на фермы (например, облегчением кровли) вероятность разрушения фасонки с указанными выше дефектами оказывается на  $50\%$  ниже (табл. 5).

Таблица 5

Характеристика фасонки	Вероятность разрушения в	
	температура от $+20$ до $-20^\circ \text{C}$	температура от $-40$ до $-60^\circ \text{C}$
Фасонки, имеющие трещины длиной $10-30 \text{ мм}$ :		
в зоне поясов . . . . .	$<0,1$	$<0,2$
»  »  стоек . . . . .	$<0,02$	$<0,02$
»  »  раскосов . . . . .	$<0,02$	$<0,02$

В соответствии с приведенными данными возможность разрушения элементов конструкций при отсутствии исходных макродефектов в условиях нормативных эксплуатационных нагрузок практически отсутствует.

С понижением температуры эксплуатации, увеличением напрягаемых объемов, с переходом от статических нагрузок к циклическим и ударным, опасность хрупкого разрушения увеличивается. Повышение сопротивления конструкций хрупкому разрушению может достигаться применением соответствующих сталей с пониженной хладноломкостью, конструктивных форм, обеспечивающих невысокую концентрацию напряжений, назначением технологии изготовления конструкций, обеспечивающей заданные

уровень дефектности конструкций и пластических деформаций в наиболее нагруженных элементах. Одним из важных способов обеспечения прочности конструкций при низких температурах является дефектоскопический контроль металла, и особенно сварных соединений, как на стадии изготовления конструкций, так и при их эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А н у ч к и н Н. П. Прочность сварных магистральных трубопроводов. Гос-техиздат, 1963.
2. Совещание-семинар по строительству на вечномерзлых грунтах. Материалы секции механизации и строительства, вып. 1. Магадан, 1964.
3. В и н к л е р О. Н., М а х у т о в Н. А. Анализ хрупких разрушений строительных стальных конструкций. Тезисы доклада на Всесоюзном научно-техническом совещании «Прогрессивные методы и средства повышения сопротивления элементов конструкций и машин хрупкому разрушению». Новосибирск, 1970.
4. М а х у т о в Н. А., В и н к л е р О. Н. Сопротивление строительных сталей хрупкому разрушению в связи с характеристиками рассеяния. Тезисы доклада на Всесоюзном научно-техническом совещании «Прогрессивные методы и средства повышения сопротивления элементов конструкций и машин хрупкому разрушению». Новосибирск, 1970.
5. М е л ь н и к о в Н. П. Некоторые вопросы хрупкого разрушения строительных стальных конструкций. В сб.: «Материалы по металлическим конструкциям», вып. 7 ЦНИИПроектстальконструкция. Стройиздат, 1962.