

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ

по дисциплине

**«Проектирование  
сварных конструкций»**

лекция №12

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

## **Тема 6 Особенности поведения основного металла и сварных соединений при низких температурах.**

- Первая и вторая критические температуры.
- Основные факторы, влияющие на хладостойкость сварных соединений.
- Оценка свойств сварных соединений и элементов конструкций при низких температурах.
- Примеры хрупких разрушений и методы повышения хладостойкости сварных соединений.

## Изменение свойств металлов при понижении температур

У подавляющего большинства металлов **при понижении температуры предел прочности, предел текучести, твердость увеличиваются**, и, казалось бы, эти изменения свойств могут быть использованы для назначения более высоких допустимых напряжений и облегчения конструкций. Однако это удается сделать редко.

Во-первых, многие конструкции эксплуатируются как при низких, так и при повышенных температурах, что заставляет ориентироваться на более низкие значения  $\sigma_{02}$ .

Во-вторых, почти во всех деталях и конструкциях имеется концентрация напряжений, а при понижении температуры чувствительность многих металлов к надрезам резко возрастает. На первый план выступает сопротивляемость хрупким разрушениям.

Характер изменения свойств металлов при понижении температуры зависит от многих факторов — вида кристаллической решетки, химического состава, величины зерна, термической обработки проявляется по-разному в зависимости от условий нагружения и напряженного состояния.

У металлов и сплавов с гранецентрированной кубической решеткой с понижением температуры предел текучести по сравнению с пределом прочности повышается незначительно — они относятся к *ХЛАДОСТОЙКИМ*. Пластичность и ударная вязкость у них почти не меняются.

У металлов и сплавов с объемноцентрированной кубической решеткой предел текучести повышается значительно сильнее, чем предел прочности, пластичность заметно понижается — они относятся к *ХЛАДНОЛОМКИМ*.

При понижении температуры.:

1. Пластичность обычно уменьшается. Более резко — у конструкционных углеродистых и низколегированных сталей. Слабее — у других металлов.
2. Сопротивление усталости при переменных нагрузках в большинстве случаев возрастает.
3. Чувствительность к концентрации напряжений при острых надрезах возрастает, а ударная вязкость (работа разрушения) уменьшается наиболее заметно у железа, углеродистых сталей невысокой прочности

Наиболее простым методом оценки изменения свойств является испытание на ударную вязкость.

Принято определять так называемую **первую критическую температуру  $T_{кр1}$** , при которой площадь волокнистого излома составляет 50 %.

Для конкретных деталей или узлов может быть путем испытаний определена так называемая **вторая критическая температура  $T_{кр2}$** , при которой среднее разрушающее напряжение образца или конкретной детали становится равным пределу текучести металла при этой температуре

Критическая температура характеризует переход от матового (волокнистого) излома к хрупкому и является сравнительным параметром для характера хрупкого разрушения различных материалов.

Для определения критической температуры перехода используется температура:

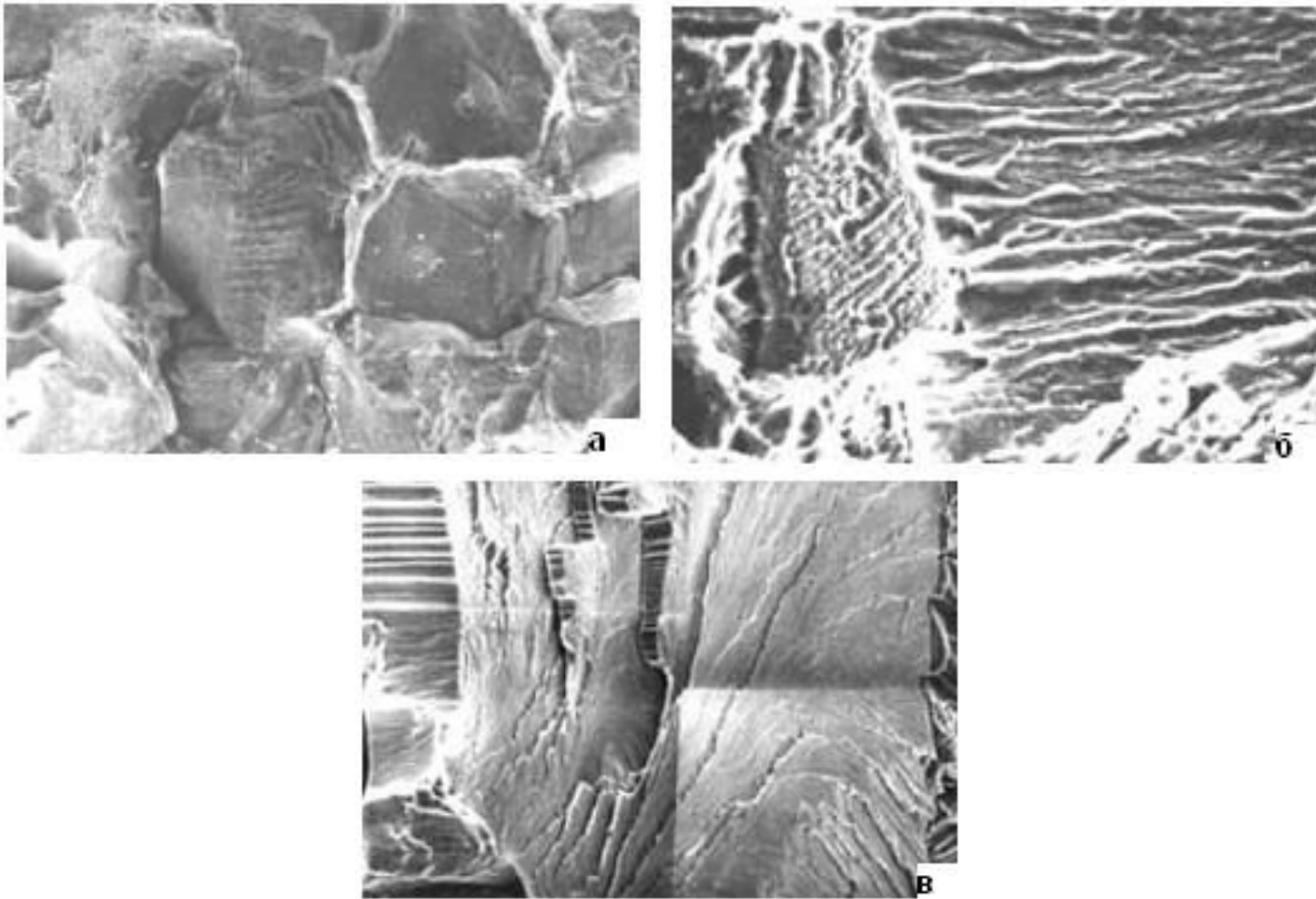
- 1) при которой доля поверхности хрупкого разрушений составляет 50% общей поверхности излома;
- 2) при которой поверхность хрупкого разрушения составляет 70% общей поверхности излома;
- 3) при которой происходит абсолютно хрупкое разрушение;
- 4) соответствующая ударной вязкости  $35 \text{ Дж/см}^2$ ;
- 5) соответствующая ударной вязкости  $21 \text{ Дж/см}^2$ ;
- 6) соответствующая половине разности между максимальной и минимальной ударной вязкости.

Наиболее широкое применение для определения критической температуры с помощью испытания на ударный изгиб надрезанных образцов находят критерий 1 и 4.

Критическая температура сталей и сварных соединений зависит в значительной степени от структуры (например, от величины зерна). Поэтому при оценке критической температуры необходимо обязательно учитывать структуру и предварительную обработку материала.

**Хрупкий излом** характеризуется полным отсутствием или весьма незначительной величиной пластических деформаций. При хрупком изломе в зоне разрушения кристаллическое строение материала хорошо наблюдается невооруженным глазом, особенно в месте расположения концентратора напряжений. *Хрупкий излом* имеет блестящую кристаллическую поверхность, на которой достаточно четко видны зерна определенных размеров и формы, так как разрушение происходит без значительной пластической деформации. Хрупкое разрушение может быть межкристаллическим (по границам зерен) и транскристаллическим (по телу зерен). Это наиболее опасный и быстрый вид разрушения, приводящий к преждевременному внезапному отказу деталей в условиях эксплуатации.

**Вязкий излом** обусловлен наличием макропластической деформации. Вязкий излом появляется в результате превышения предела текучести материала детали. На поверхности вязкого излома наблюдаются следы пластической деформации. *Вязкий излом* имеет матовую поверхность и обычно волокнистое строение с зернами сильно искаженных размеров и формы, так как разрушение сопровождается значительной пластической деформацией. Вязкий излом менее опасен, чем хрупкий.



*Рис. 4. Изображения изломов при межзеренном хрупком (а) и вязком (б) разрушении; скол (в) x 3000.*

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Испытание стали и сварных соединений проводится на маятниковых копрах. Температура образцов в момент разрушения не должна более чем на  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  отклоняться от температуры испытания. Измерение температуры должно проводиться с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

В качестве хладагента используется смесь жидкого азота и этилового или гидролизного спирта. Образцы охлаждаются на несколько градусов ниже заданной температуры испытания.

Время выдержки при заданной температуре с учетом необходимого переохлаждения должно составлять по меньшей мере 10 мин.

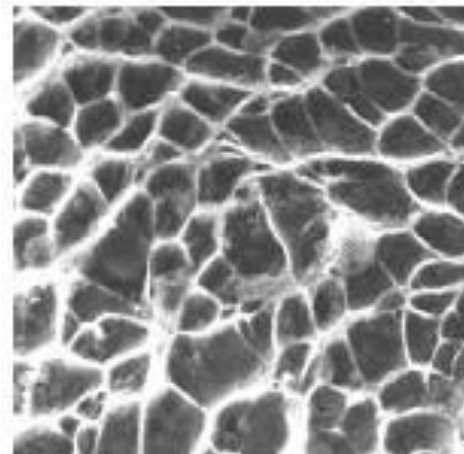
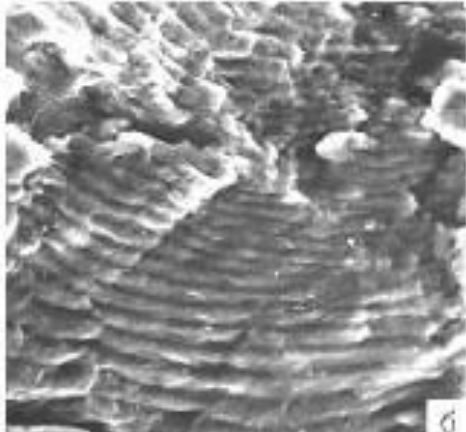
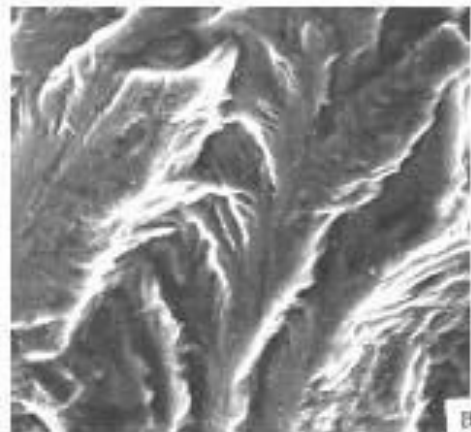
### ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

По установленным размерам поперечного сечения и работы удара рассчитывается ударная вязкость ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ). Найденные значения ударной вязкости представляются графически в метрических координатах в зависимости от температуры испытания. По точкам измерения проводится усредненная кривая. Для значения ударной вязкости  $35 \text{ Дж}/\text{см}^2$  по кривым определяется критическая температура  $T_{\text{ПЕР}}$ .

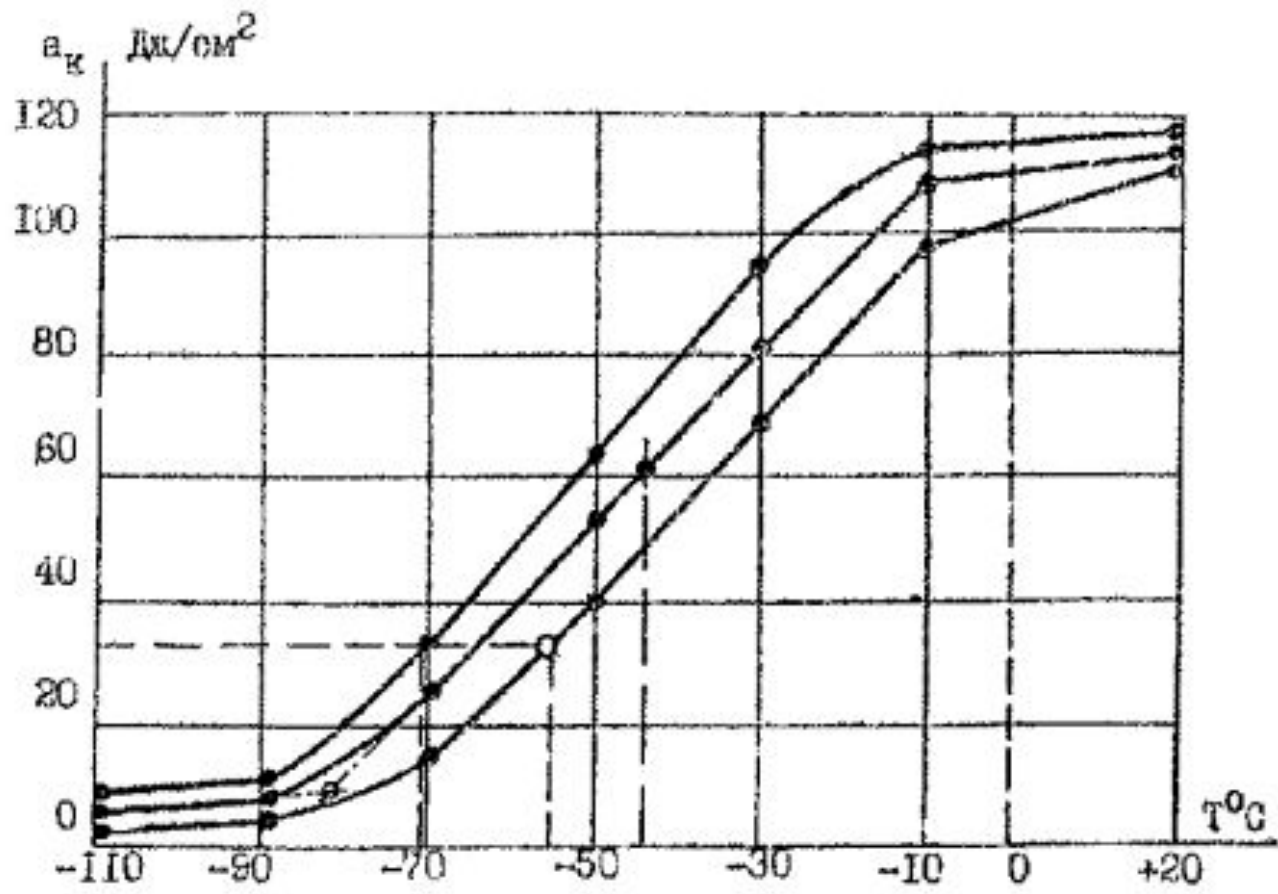
По визуальной оценке поверхности излома определяются критические температуры для 50%-й площади кристаллического излома.



Следует отметить, что в машиностроении при эксплуатации изделий, в случае аварийной ситуации, наиболее часто в изломах обнаруживают усталостный механизм разрушения, что свидетельствует о циклическом изменении одного из внешних параметров.



Характерные признаки таких изломов, выявляют, прежде всего, методом растровой электронной микроскопии. **Фрактографический анализ** изломов испытанных усталостных образцов позволяет заключить, что по мере увеличения длины магистральной трещины и уменьшения живого сечения образца, на его поверхности всегда формируются три характерные зоны разрушения. На смену области зарождения усталостной трещины (рис. ,а) приходит область ее стабильного распространения с большими полями регулярных усталостных бороздок (рис. ,б). И, наконец, область долома (рис. ,в), соответствующая быстрому квазистатическому разрушению заключительной части образца, где механизм усталостного разрушения дополняется механизмом однократного квазистатического разрушения.



1 - для верхней кривой  $T_{\text{пер.}} = -70^{\circ}\text{C}$ ; 2 - для нижней кривой  $T_{\text{пер.}} = -54^{\circ}\text{C}$

Существуют специальные методы для определения **температур торможения движущихся трещин** (при более низких температурах в ответственных конструкциях металл применять нельзя). В частности, метод Робертсона предусматривает испытание листовых образцов относительно большой ширины (несколько сотен миллиметров) с натуральной толщиной металла  $s$ . Перед разрушением образец с одной стороны подогревается, а с другой — охлаждается. К образцу вначале прикладывают растягивающее напряжение, а затем наносят удар для создания движущейся трещины. В некоторой зоне с известной температурой трещина останавливается.

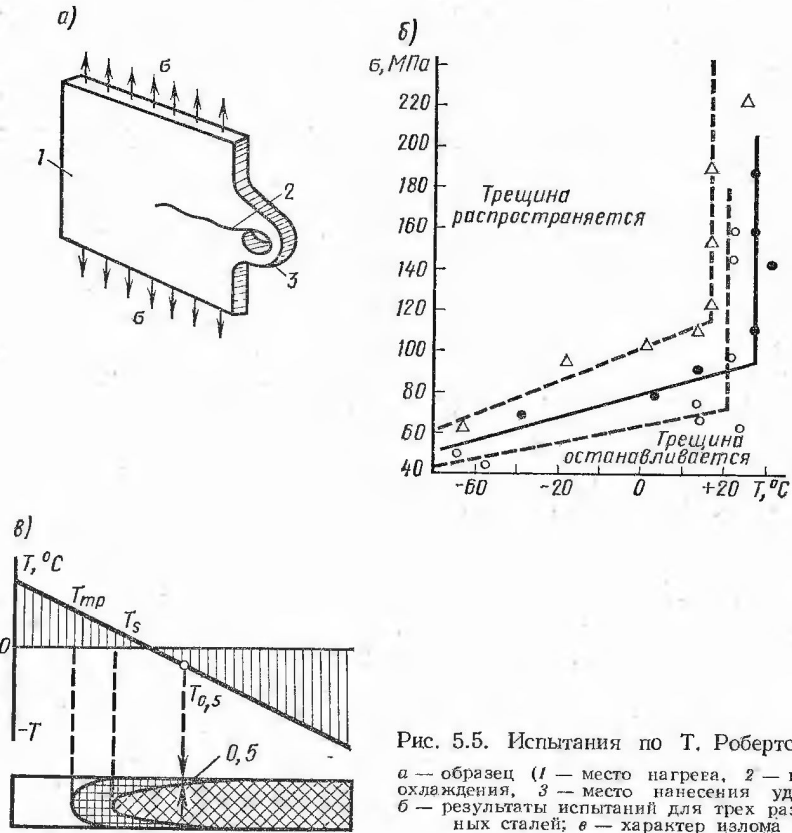


Рис. 5.5. Испытания по Т. Робертсону: а — образец (1 — место нагрева, 2 — место охлаждения, 3 — место нанесения удара); б — результаты испытаний для трех различных сталей; в — характер излома

**Верхним порог хладноломкости** - температура, при которой *полностью исчезают в изломе образцов хрупкие участки.*

### ФАКТОРЫ , СНИЖАЮЩИЕ ХЛАДНОСТОЙКОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ

1) **Термический цикл**, который зависит от погонной энергии и скорости сварки, определяет скорость охлаждения. Он способен вызывать рост зерна, закалку металла, его старение, отпуск и т. д. Одни и те же условия сварки неоднозначно влияют на порог хладноломкости шва и околошовных зон двух близких по составу сталей СтЗсп и 20. (Штриховкой показан диапазон погонных энергий, благоприятный для металла шва.)

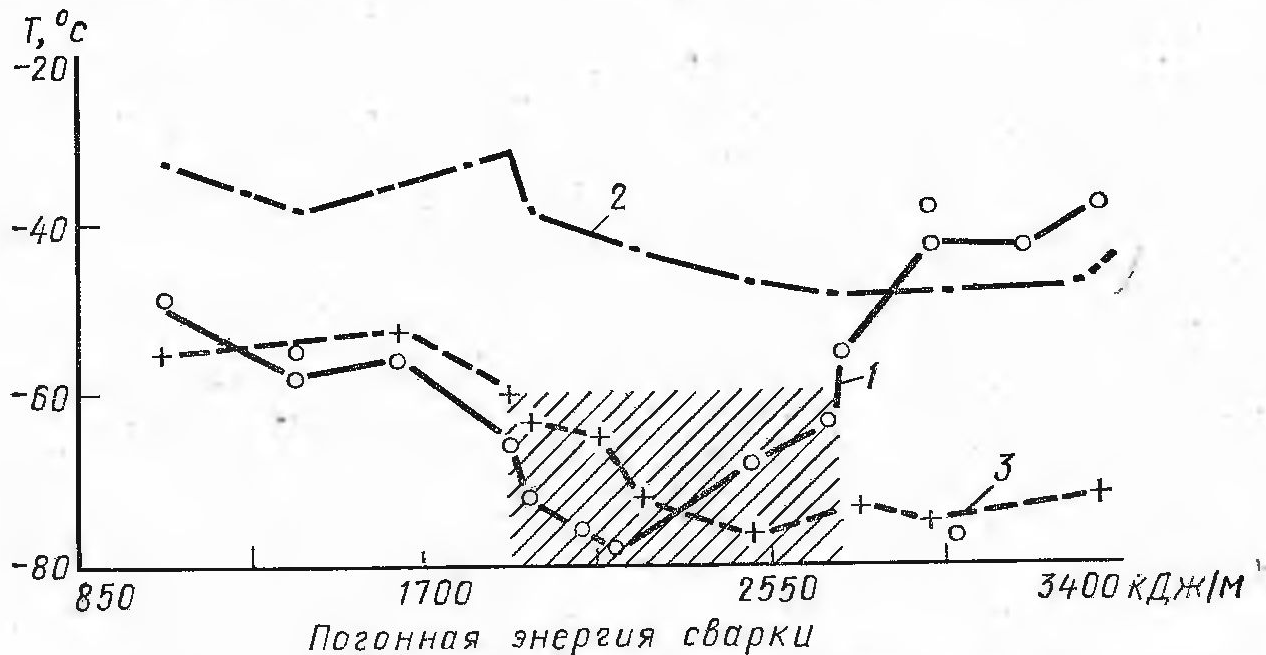


Рис. 5.7. Влияние погонной энергии сварки на положение верхних порогов хладноломкости металла шва при сварке электродами УОНИ 13/45 (1), зоны рекристаллизации стали СтЗсп (2), зоны рекристаллизации стали 20 (3)

Вредное влияние термического цикла сварки на свойства металла околошовных зон и шва можно уменьшить, применяя подогрев или последующую термическую обработку сварного изделия. В табл. приведены данные по испытанию образцов на ударный изгиб.

**Влияние подогрева и термической обработки на вязкость и пластичность образцов с наплавкой**

| Состояние                               | Работа ударного изгиба $\alpha_H$ , МДж/м <sup>2</sup> | Угол загиба $\alpha$ , град | Примечания                 |
|---|--|-----------------------------|----------------------------|
| Без наплавки                            | $> 3,0$  | 30                          | Образцы не разрушались     |
| Наплавка с подогревом и местным отжигом | $> 2,97$   | 26                          | То же                      |
| Наплавка без подогрева с общим отжигом  | $> 2,85$   | 22                          | »                          |
| Наплавка с подогревом без отжига        | 1,1  | 13                          | Образцы разрушались хрупко |
| Наплавка без подогрева и без отжига     | 0,39   | 0                           | То же                      |

**2) Пластические деформации металла и деформационное старение относятся к наиболее сильным отрицательным факторам, вызывающим хрупкость при понижении температуры в случае, если они происходят в неблагоприятно ориентированных концентраторах напряжений, расположенных в зоне нагрева от сварки.**

К неблагоприятно ориентированным относятся концентраторы, плоскость которых расположена перпендикулярно направлению главной деформации удлинения. Это, например, непровары в перпендикулярно пересекающихся стыковых швах, непровары в корне многослойных швов, где концентрируются пластические деформации по мере укладки слоев, это стыки двух не сваренных между собой элементов, пересекаемые перпендикулярными швами, концы фланговых швов в зоне перехода стержневого элемента к косынке, места остановки процесса сварки, в которых возник непровар, плоскость которого перпендикулярна оси шва, места пересечения соединений с неполностью проваренными швами.

К неблагоприятно ориентированным концентраторам относятся также линии перехода от шва к основному металлу и непровары в тех случаях, когда на некотором небольшом расстоянии от них параллельно укладываются короткие швы, поперечная местная усадка которых вызывает концентрацию пластических деформаций.

3) Форма сварных соединений в случае вязкого состояния металла и отсутствия дефектов, как правило, при однократном нагружении не является причиной разрушения сварных конструкций при средних напряжениях, меньше расчетных или близких к ним. При хрупком или полухрупком состоянии металла неудачная форма сварных соединений может оказаться достаточной причиной, чтобы произошло разрушение из-за концентрации напряжений. Опасность тех или иных конструктивных форм зависит от степени охрупчивания металла.

3) **Дефектами сварных соединений**, способными вызвать разрушения при низких температурах, могут быть в первую очередь несплавления, трещины, плоские по форме шлаковые включения, острые подрезы, места пересечения швов с участками расслоения металла, мелкие невидимые трещины в угловых швах нахлесточных соединений, непроверенные места остановки процесса сварки, а также резкие вырезы с малыми радиусами после термической резки, неплавные переходы корневых валиков к основному металлу в многослойных швах, глубокие неровности от чешуйчатость поверхности шва, сильные сужения швов из-за нарушения режима сварки.



| Марка электрода<br>АНО-6                             |                  | Условное обозначение:<br>Э42-АНО-6-d-УД<br>Е 412(3)-Р 21   |                                     |                          |   | ГОСТ<br>9466-75, 9467-75  |                                     |              |              |                      |  |
|--|------------------|--|-------------------------------------|--------------------------|---|---------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------------|--|
| ISO: E 433 AR 21                                     |                  | Область применения: Для сварки конструкций из низкоуглеродистых марок сталей с временным сопротивлением разрыву не более 430 МПа |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| Тип покрытия: рутиловый                              |                  |  |                                     |                          |   | Коэффициент расхода: 1.70 |                                     |              |              |                      |  |
| Род тока: ~,-  |                  | Полярность: +,-  |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| Диам., мм  | Исв, А           | Производ-сть   |                                     | Выход наплав. металла, % | Положение свариваемых швов в пространстве   |                           |                                     |              |              |                      |  |
|  |                  | г/мин  | г/А.час                             |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| 3.00   | 80-120           | 18.0   | 8.5                                 | 93                       | Нижнее +<br>Угловые, тавровые швы +<br>Вертикальное, снизу вверх +<br>Горизонт. на верт. плоск. +<br>Потолочное +<br>Вертикальное сверху вниз + |                           |                                     |              |              |                      |  |
| 4.00   | 130-200          | 29.5   | 9.5                                 |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| 5.00   | 150-270          | 40.5   |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| 6.00   | 280-350          | 52.0   |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| Химический состав наплавленного металла, % по массе: |                  |  |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| С  | Мn               | Si   |                                     |                          |   |                           |                                     | S            | P            |                      |  |
| 0.10<br>max  | 0.60-<br>0.80    | 0.08-<br>0.15  |                                     |                          |   |                           |                                     | 0.040<br>max | 0.040<br>max |                      |  |
| Механические свойства металла шва:                   |                  |  |                                     |                          |   |                           |                                     |              |              |                      |  |
| Вр.сопр разр., МПа                                   | Предел тек., МПа | Относ. удл., %   | КСV, Дж/см <sup>2</sup> , при Т, °С |                          |   |                           | КСU, Дж/см <sup>2</sup> , при Т, °С |              |              | t <sub>35</sub> , °С |  |
|  |                  |  | +20                                 | -20                      | -40   | -70                       | +20                                 | -20          | -40          |                      |  |
| 460  | 350              | 22   | 127                                 | 98                       | 78  |                           |                                     |              | 29           | -20                  |  |

Методы повышения хладостойкости сварных соединений и конструкций состоят в следующем. Используются такие сварочные материалы, которые при оптимальных режимах сварки и последующей термической обработке дают металл шва, не уступающий по хладостойкости основному металлу.



Осуществляется подбор режима сварки, обеспечивающий достаточную хладостойкость зон термического влияния. При этом стремление уменьшить зону термического влияния и разупрочнения в диапазоне температур высокого отпуска приводит к необходимости сваривать при малых погонных энергиях, а это, в свою очередь, создает высокие скорости охлаждения и вызывает сильную закалку в зоне перекристаллизации. Применение последующего **отпуска** может облегчить задачу подбора режимов сварки. Известно, что в ряде случаев высокий отпуск снижает выносливость сварных соединений. Опасность хрупкого разрушения представляется более существенной, чем некоторое снижение выносливости, поэтому для конструкций, работающих при низких температурах, обычно назначают высокий отпуск.

Рациональное конструктивное оформление сварных узлов, устранение малых радиусов перехода, отсутствие несправов и применение эффективных методов контроля качества также позволяют существенно повысить сопротивляемость хрупким разрушениям. Для повышения сопротивляемости хрупким разрушениям при низких температурах можно предварительно нагружать конструкции при нормальных температурах, когда невозможны хрупкие разрушения. Появление в концентраторах больших пластических деформаций, которые должны были бы возникнуть при низких температурах, увеличивает радиус концентратора и создает после разгрузки в зоне концентратора остаточные сжимающие напряжения.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**