

# КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ

по дисциплине

## **«Проектирование сварных конструкций»**

лекция №4

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

# СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

- Механические свойства сварных соединений.
- Условия обеспечения равнопрочности основного металла и сварного соединения.
- Методы определения фактических механических свойств сварных соединений.
- Механическая неоднородность в сварных соединениях, ее влияние на работоспособность.
- Мягкие и твердые прослойки в сварных соединениях. Эффект контактного упрочнения.
- Напряженное состояние и прочность мягкой прослойки.
- Работа твердых прослоек.

Механические свойства сварного соединения в целом являются свойствами комплексными, так как они зависят от соотношения механических свойств металла шва, металла зоны термического влияния и основного металла.

Если исходить из свойств основного металла, то очевидно, что сварное соединение на конструкционных сталях можно считать доброкачественным, если оно обеспечивает величины предела прочности и предела текучести не ниже, чем у основного металла, при достаточном запасе пластичности.

**Механические свойства металла шва зависят от следующих факторов:**

- 1) выбора сварочных материалов (электродов, проволоки, флюса);**
- 2) химического состава основного металла;**
- 3) режима сварки и технологии сварки;**
- 4) размеров (особенно толщины) изделия и скорости охлаждения;**
- 5) величины пластических деформаций в металле шва.**

По ГОСТ 9467-60 каждый тип электрода обеспечивает определенные механические свойства металла шва применительно к определенной марке стали (например, для типов Э42-Э55 на Ст. 3). Переход к сварке более легированной стали приводит к необходимости дополнительного легирования металла шва и получению более высоких механических свойств. Такое же положение и при сварке под флюсом. При ручной сварке режим ее изменяется в сравнительно узких пределах, поэтому, как показали отдельные исследования, влиянием режима сварки на механические свойства можно пренебречь. При автоматической и полуавтоматической сварке все параметры режима сварки изменяются в значительно более широком диапазоне и это необходимо учитывать

**Механические свойства металла ЗТВ в значительной степени зависят от химического состава основного металла и склонности его к закалке. Непосредственное определение механических характеристик металла ЗТВ затруднительно в связи с небольшой шириной ЗТВ и трудностью изготовления разрывных образцов. Изменение механических свойств ЗТВ обычно характеризуют изменением твердости по поперечному сечению сварного образца.**

**При сварке судостроительных углеродистых и низколегированных сталей повышение твердости на участке крупного зерна достигает 20-30% со снижением пластичности на 10-15%. Несмотря на указанное обстоятельство, поведение всего сварного соединения, как правило, не определяется изменением механических свойств ЗТВ ввиду небольших размеров этой зоны по сравнению с размером шва, не говоря уже о размерах свариваемых элементов.**

**Указанное обстоятельство подтверждается как при статических, так и при вибрационных и ударных испытаниях сварных соединений вплоть до разрушения; оно связано также и с тем, что размер ЗТВ всегда больше соответствующей толщины металла, так как ЗТВ имеет криволинейную поверхность (по форме шва), в результате прочность соединения в ЗТВ оказывается не ниже прочности основного металла и разрушение происходит по основному металлу.**

**По этой причине в подавляющем большинстве случаев при сварке малоуглеродистых и низколегированных сталей каких-либо мер для выравнивания структуры в пределах сварного соединения не применяют.**

## **ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств»**

Стандарт устанавливает методы определения механических свойств при следующих видах испытаний:

- а) испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на статическое (кратковременное) растяжение;**
- б) испытании металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла на ударный изгиб (на надрезанных образцах);**
- в) испытании металла различных участков сварного соединения на стойкость против механического старения;**
- г) измерении твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;**
- д) испытании сварного соединения на статическое растяжение;**
- е) испытании сварного соединения на статический изгиб (загиб);**
- ж) испытании сварного соединения на ударный разрыв.**

Стандарт распространяется на испытания, проводимые при определении качества продукции и сварочных материалов, пригодности способов и режимов сварки, при установлении квалификации сварщиков и показателей свариваемости металлов и сплавов.

Образцы для испытаний вырезают из контролируемой конструкции или из специально сваренных пластин. Ширину пластин принимают равной

50 мм при толщине листа до 4 мм;

70 мм при 4—10 мм;

100 мм при 10—20 мм;

150 мм при 20—50 мм; 2

00 мм при 50—100 мм;

250 мм при 100 мм.

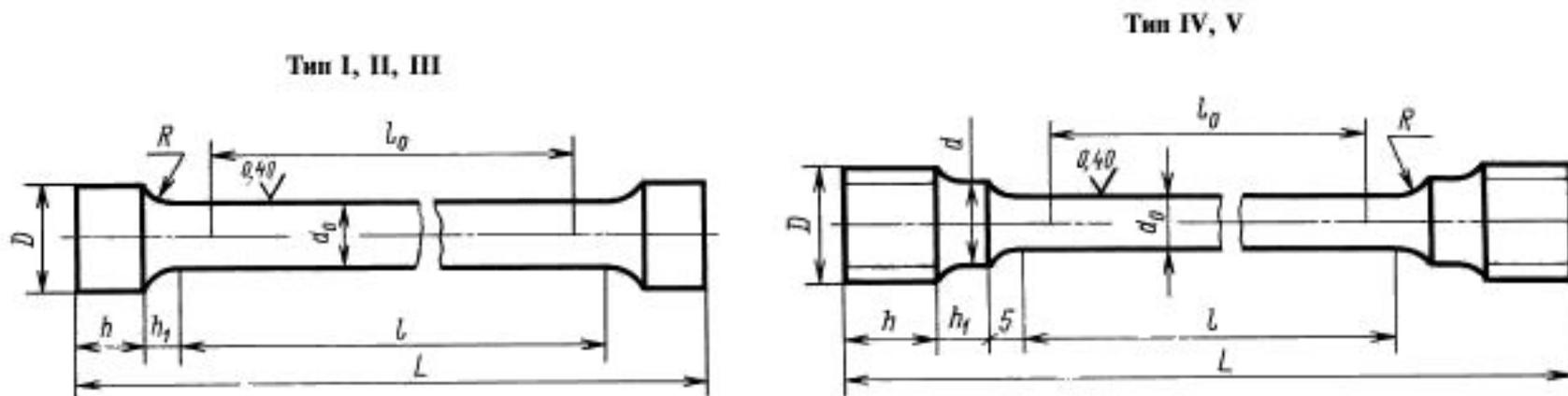
# ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА СТАТИЧЕСКОЕ (КРАТКОВРЕМЕННОЕ) РАСТЯЖЕНИЕ

Определяют следующие характеристики механических свойств:

- предел текучести физический  $\sigma_T$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>) или предел текучести условный  $\sigma_{0,2}$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- временное сопротивление  $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм<sup>2</sup>);
- относительное удлинение после разрыва (на пятикратных образцах)  $\delta_5$ , %;
- относительное сужение после разрыва,  $j$ , %.

Испытания проводят для металла шва, металла различных участков зоны термического влияния наплавленного металла при всех видах сварки плавлением.

Форма и размеры образцов, должны соответствовать таблице



Размеры в мм

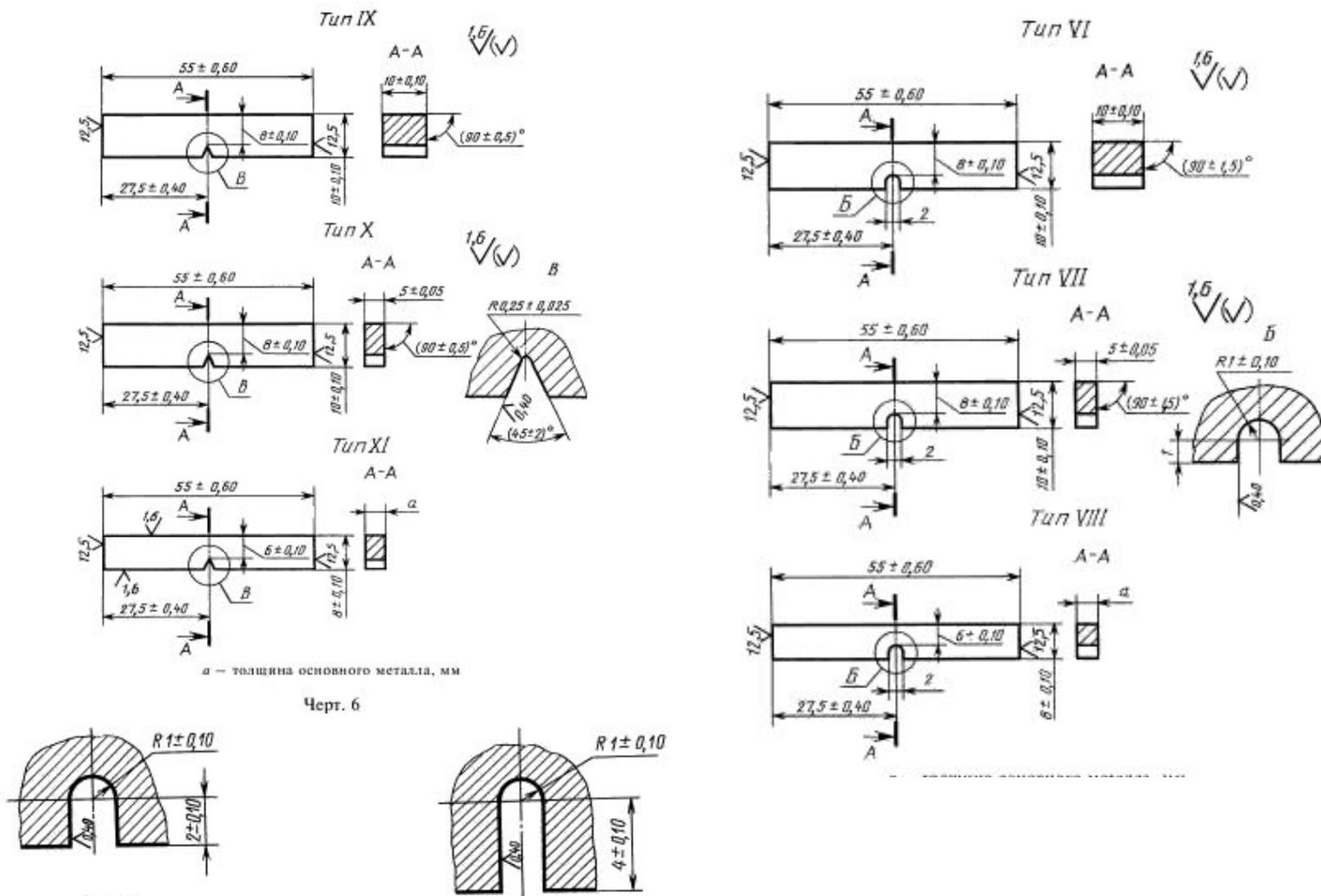
Таблица 1

| Тип образца | $d_0$        | $d$ | $K$  | $D$ | $h$ | $h_1$ | $R$ | $h_0$ | $l$ | $L$<br>$\pm 1$ |
|-------------|--------------|-----|------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|----------------|
| I           | $3 \pm 0,1$  | —   | 0,03 | 6   | 4   | 2     | 1   | 15    | 18  | 30             |
| II          | $6 \pm 0,1$  | —   | 0,03 | 12  | 10  | 2,5   | 1,5 | 30    | 36  | 61             |
| III         | $10 \pm 0,2$ | —   | 0,04 | 16  | 10  | 3     | 3   | 50    | 60  | 86             |
| IV          | $6 \pm 0,1$  | 10  | 0,03 | M12 | 15  | 5     | 5   | 30    | 36  | 86             |
| V           | $10 \pm 0,2$ | 12  | 0,04 | M16 | 15  | 5     | 5   | 50    | 60  | 110            |

Примечание.  $K$  — допускаемая разность наибольшего и наименьшего диаметров на длине рабочей части образца.

# ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ (НА НАДРЕЗАННЫХ ОБРАЗЦАХ)

При испытаниях определяют ударную вязкость или работу удара, или процентное соотношение хрупкой и вязкой составляющей поверхности излома. Для испытаний применяют образцы с V-образным и U-образным надрезом



5.3. Условное обозначение ударной вязкости или работы удара включает: символ ударной вязкости (КС) или работы удара (К); вид надреза (концентратора) (U, V); температуру испытания (температуру 20 °С не проставляют); максимальную энергию удара маятника (максимальную энергию 300 Дж не проставляют); тип образца (типы образцов VI и IX не проставляют); место расположения надреза (Ш — шов, ЗС — зона сплавления, ЗТВ — зона термического влияния,  $l$  — расстояние от границы сплавления до оси надреза). Значение  $l$  оговаривают в стандартах или другой технической документации. При расположении надреза поперек металла шва, зоны сплавления или зоны термического влияния в конце обозначения ставят букву П.

Примеры условных обозначений:

1. Ударная вязкость, определяемая на образце типа VII, при температуре 100 °С, при максимальной энергии удара маятника 150 Дж, с надрезом вида U, расположенным по зоне сплавления:

КСU<sup>+100</sup> 150 УПЗС.

2. Ударная вязкость, определяемая на образце типа XI, при температуре минус 40 °С, при максимальной энергии удара маятника 50 Дж, с надрезом вида V, расположенным по зоне термического влияния на расстоянии ( $l$  мм) от границы сплавления до оси надреза:

КСV<sup>-40</sup> 50 XI ЗТВ $l$ .

# ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА СТОЙКОСТЬ ПРОТИВ МЕХАНИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

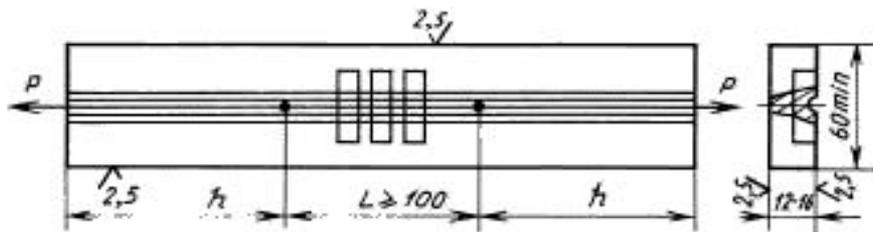
6.1. Стойкость против механического старения характеризуется изменением ударной вязкости металла, подвергнутого старению по сравнению с ударной вязкостью его в исходном состоянии. О стойкости металла против механического старения судят по выраженному в процентах отношению этих величин или абсолютному (нормативному) значению ударной вязкости после старения. Испытания проводят для металла шва и различных участков металла околошовной зоны.

6.2. Заготовки подвергают искусственному старению по методике: деформация растяжением из расчета получения  $(10 \pm 0,5)$  % остаточного удлинения в пределах расчетной длины  $l$ , ограниченной кернами или рисками. Рекомендуется на поверхности образцов через каждые 10 мм наносить риски для проверки равномерности деформации по длине расчетной части.

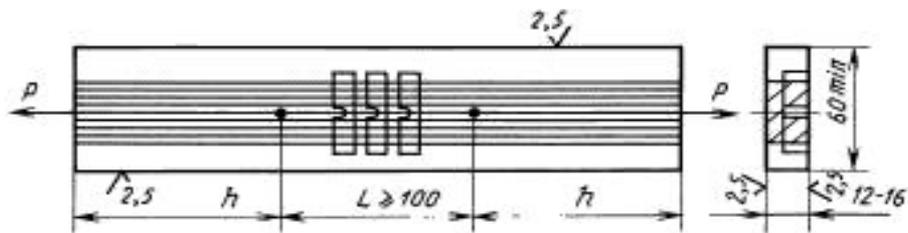
После удлинения заготовку подвергают равномерному нагреву в течение 1 ч при температуре 250 °С (523 °К) с последующим охлаждением на воздухе. Из рабочей части заготовок по черт. 14, 15

или 17 отбирают образцы типа VI или IX, а по черт. 16 — типа VII или X. Ось надреза должна совпадать с осью симметрии шва. Схему отбора образцов при расположении надреза в других участках сварного соединения оговаривают стандартами или другой технической документацией.

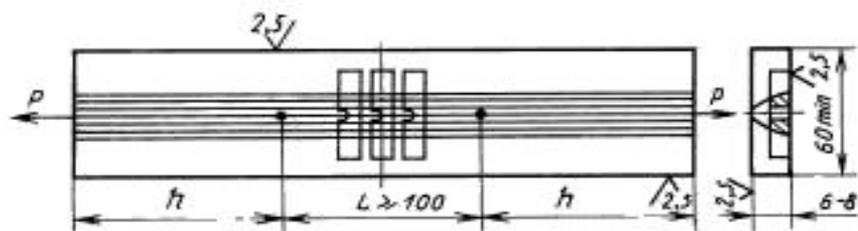
Предусмотренную данным пунктом методику старения применяют для сварных соединений из сталей. Методику старения для других металлов и сплавов, а также иную температуру нагрева или величину деформации для соединений из стали оговаривают стандартами или другой технической документацией.



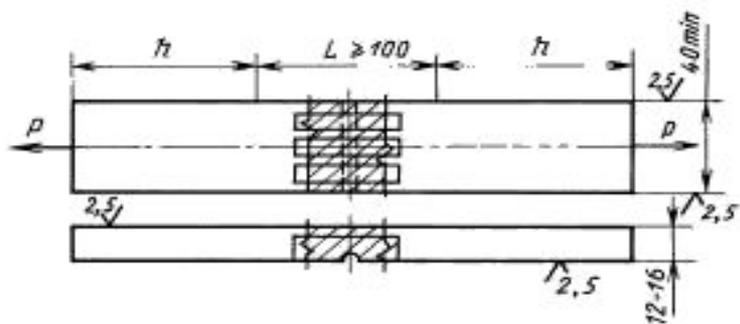
Чепр. 14



Чепр. 15



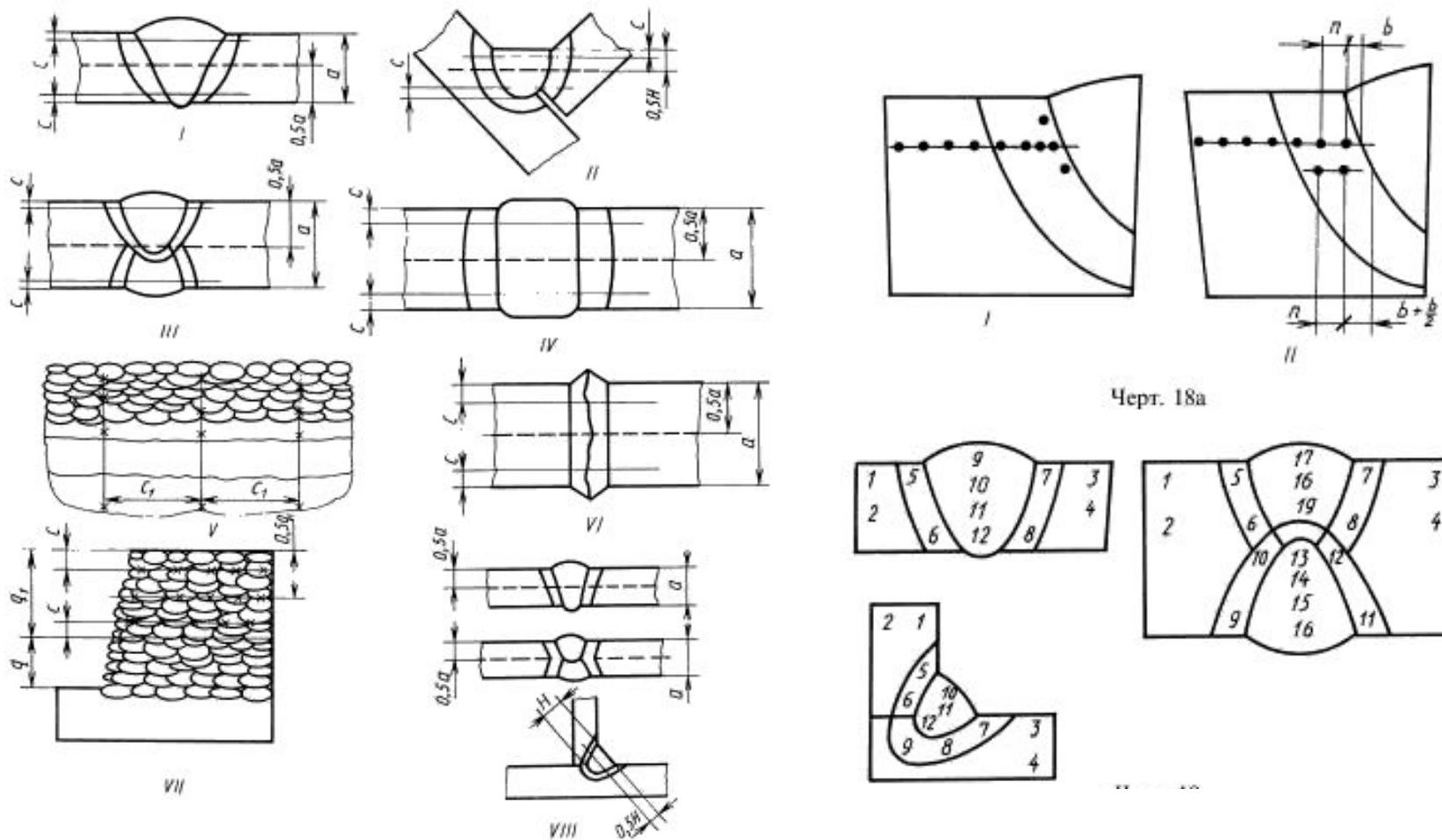
Чепр. 16



Чепр. 17

# ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Твердость измеряют в поперечном сечении (см. рисунки) Металлографические исследования включают исследование макроструктуры, сплошности и формы шва (шлаки, трещины, непровары, поры). Образцы (шлифы) для металлографических исследований контрольных сварных соединений, выполненных на трубных элементах, должны вырезаться поперек шва (вдоль трубы). Образцы для макроисследования сварных соединений должны включать: – все сечение шва; – зону термического влияния сварки; – прилегающие к ним участки основного металла.



# Измерение твердости металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла

7.2. Твердость измеряют по Виккерсу (HV), Бринеллю (HB) и по Роквеллу — шкалам А, В и С (HRA, HRB и HRC), отдавая предпочтение замеру по Виккерсу.

Твердость по Виккерсу измеряют по ГОСТ 2999. Нагрузка на индентор в зависимости от прочности металла участков сварного соединения и ширины зоны термического влияния должна составлять 98 Н (HV10) или 49Н (HV50). При наличии в стандартах или другой технической документации соответствующих указаний, измеряют твердость по Виккерсу. Нагрузка на индентор при таких замерах может меняться от 0,04 до 4,9 Н.

Твердость по Бринеллю измеряют в соответствии с ГОСТ 9012, используя стальной шарик диаметром 2,5 или 5,0 мм.

Твердость по Роквеллу измеряют в соответствии с ГОСТ 9013 при сфероконическом алмазном инденторе (шкала А и С) или шариковом стальном наконечнике диаметром 1,5875 мм.

7.3. Твердость определяют для соединений, полученных сваркой плавлением или давлением из сталей различных марок и других металлических конструкционных материалов толщиной не менее 1,5 мм.

Твердость основного металла, различных участков зоны термического влияния и металла шва измеряют по одной или нескольким линиям, указанным на черт. 18. Если соединение выполнено из металлов различных марок, то твердость измеряют для каждого из них.

При измерениях, выполняемых в непосредственной близости от границы сплавления, рекомендуется проводить 2—3 измерения в соответствии с позицией I черт. 18а или дополнительные измерения по позиции II черт. 18а.

Допускается проведение измерений на участках сварного соединения, указанных на черт. 19.

7.4. Твердость по Виккерсу измеряют на микрошлифах или образцах с полированной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна быть от 0,40 до 0,63 мкм. Твердость по Бринеллю или Роквеллу измеряют на макрошлифах или на образцах с шлифованной поверхностью, если очертания шва видны без травления. Шероховатость поверхности таких образцов должна быть от 1,25 до 2,00 мкм. В образцах должна быть соблюдена параллельность рабочей и опорной поверхностей.

7.5. Твердость стыковых и угловых соединений, выполненных дуговой сваркой, измеряют: при толщине основного металла или углового шва от 1,5 до 9 мм — в соответствии с позицией VIII

# ИСПЫТАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА СТАТИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

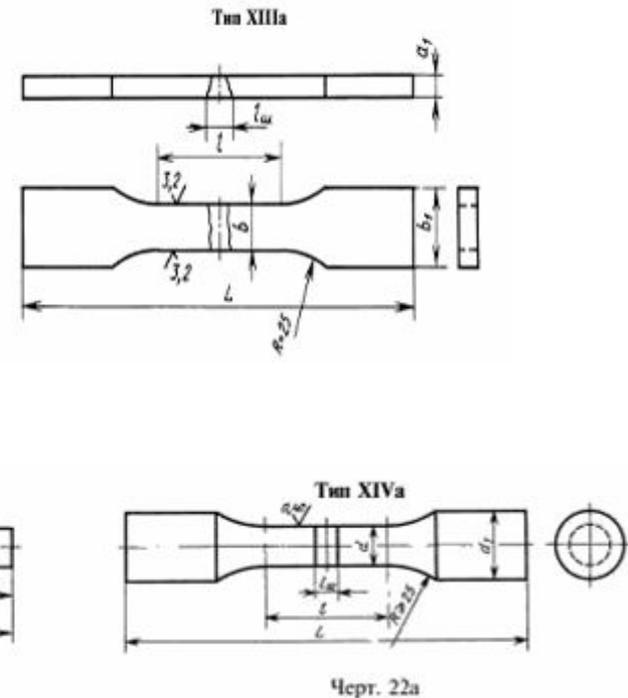
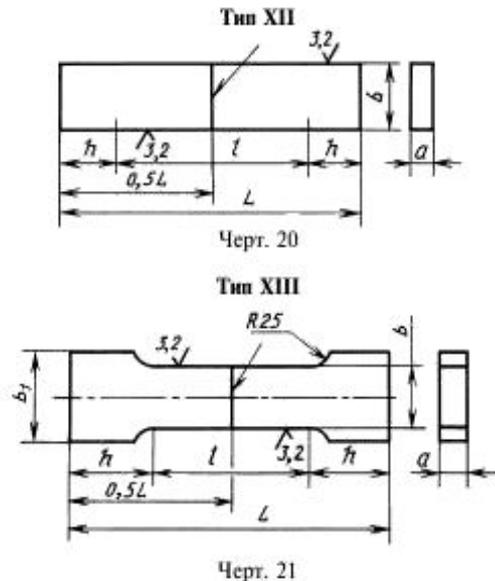
При испытании сварного соединения на статическое растяжение определяют временное сопротивление наиболее слабого участка. При испытании определяют место разрушения образца (ПО МЕТАЛЛУ ШВА, ПО МЕТАЛЛУ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ, ПО ОСНОВНОМУ МЕТАЛЛУ)

8.3. Испытания проводят, как правило, на образцах, толщина или диаметр которых равны толщине или диаметру основного металла. При испытании сварного соединения или листов разной толщины более толстый лист путем механической обработки должен быть доведен до толщины более тонкого листа.

Шероховатость поверхности после обработки более толстого элемента должна быть не более 6,3 мкм.

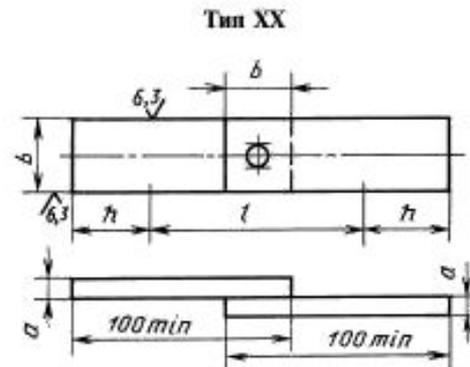
8.4. Форма и размер плоских образцов для испытания стыковых соединений должны соответствовать черт. 20, 21 или 21а и табл. 7. Допускается применение цилиндрических образцов типов I, II, III, IV и V. Металл шва в этих образцах должен располагаться по середине их рабочей части. Разрешается применение образца по ГОСТ 1497.

При испытании материалов высокой прочности разрешается изменять конструкцию захватной части образца.



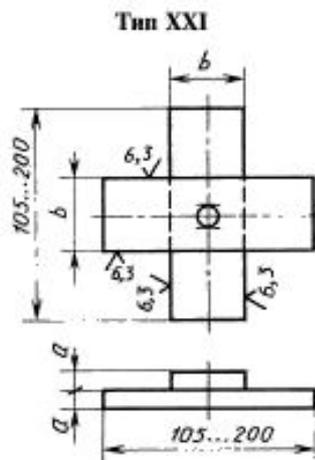
8.11. Сварные соединения, выполненные точечной сваркой и электрозаклепками, испытывают на срез путем растяжения образца, приведенного на черт. 29, или на отрыв растяжением образца, приведенного на черт. 30. При испытании электрозаклепок ширина образца во всех случаях равна 50 мм.

Размеры образцов должны соответствовать табл. 11.



$a$  – толщина основного металла, мм;  $h$  – длина захватной части (выбирают в зависимости от конструкции испытательной машины), мм;  $l$  – длина рабочей части образца, мм

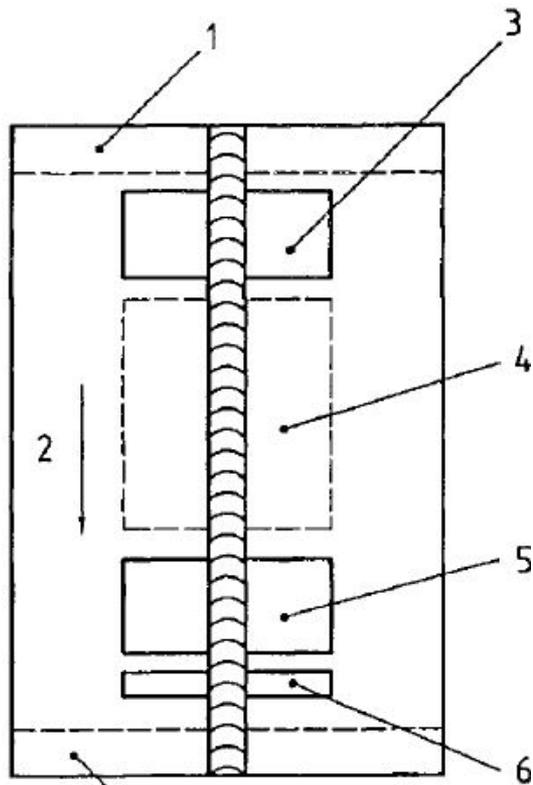
Черт. 29\*



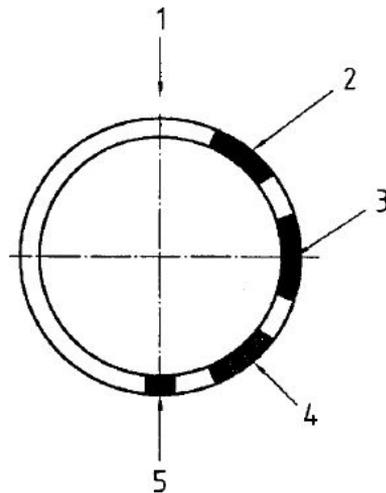
Черт. 30

Таблица 11

| мм                            |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Толщина основного металла $a$ | Ширина образца $b$ , не менее |
| До 1 включ.                   | 20                            |
| Более 1 до 2 включ.           | 25                            |
| • 2 • 3 •                     | 30                            |
| • 3 • 4 •                     | 35                            |
| • 4 • 5 •                     | 40                            |
| • 5                           | 45                            |



- Рис.1 – участки вырезки образцов для стыкового соединения пластин
- 1 – неиспользуемый участок шириной 25 мм;
- 2 – направление сварки;
- 3 – участок вырезки образцов для испытаний: одного на растяжение, двух на статический изгиб (с лицевой стороны шва и со стороны корня шва);
- 4 – участок вырезки дополнительных образцов, при необходимости;
- 5 – участок вырезки образцов для испытаний: одного на растяжение, двух на статический изгиб (с лицевой стороны шва и со стороны корня шва);
- 6 – участок вырезки образца для макроскопического исследования.



- Рис.2 – участки вырезки образцов для стыкового соединения труб
- 1 – верх неповоротной трубы;
  - 2 – участок вырезки образцов для испытаний: одного на растяжение, двух на статический изгиб (с лицевой стороны шва и со стороны корня шва);
  - 3 – участок вырезки дополнительных образцов, при необходимости;
  - 4 – участок вырезки образцов для испытаний: одного на растяжение, двух на статический изгиб (с лицевой стороны шва и со стороны корня шва);
  - 5 – участок вырезки образца для макроскопического исследования.

# ИСПЫТАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА СТАТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ

9.1. Испытания проводят для стыковых соединений. При испытании определяют способность соединения принимать заданный по размеру и форме изгиб. Эта способность характеризуется углом изгиба  $\alpha$  (черт. 36), при котором в растянутой зоне образца образуется первая трещина, развивающаяся в процессе испытания. Если длина трещин, возникающих в процессе испытания в растянутой зоне образца, не превышает 20 % его ширины, но не более 5 мм, то они не являются браковочным признаком. Определяют также место образования трещины или разрушения (по металлу шва, металлу околошовной зоны или основному металлу).

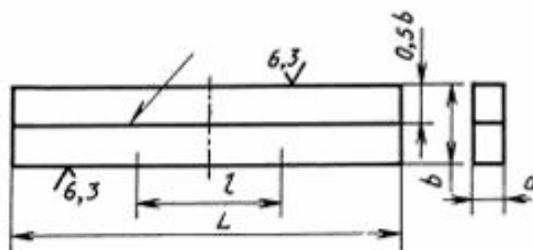
В зависимости от требований, установленных соответствующей НТД, испытания проводят до достижения нормируемого угла изгиба или угла изгиба, при котором образуется первая являющаяся браковочным признаком трещина, до параллельности или соприкосновения сторон образца. Угол изгиба при испытании до образования первой трещины измеряют в ненапряженном состоянии с погрешностью до  $\pm 2^\circ$ .



Черт. 36

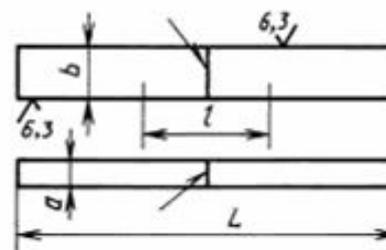
9.2. Форма и размеры плоских образцов должны соответствовать указанным на черт. 37, 38, 38а и в табл. 14.

Типы XXVI, XXVIa

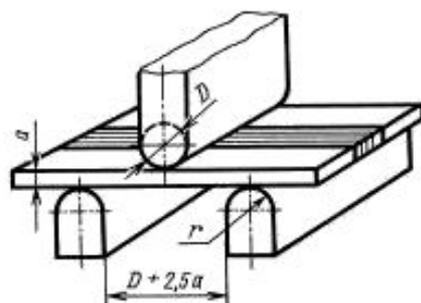


Черт. 37

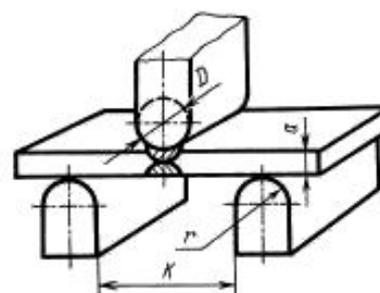
Типы XXVII, XXVIIa, XXVIII



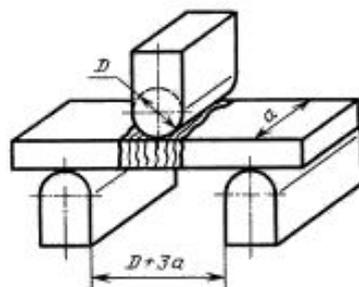
Черт. 38



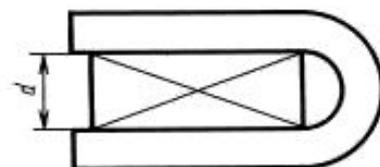
Черт. 39



Черт. 40



Черт. 40а



Черт. 41

Обязательным условием проведения испытаний является плавность возрастания нагрузки на образец. Испытания проводят со скоростью не более 15 мм/мин на испытательных машинах или прессах с использованием опорных роликов.

Диаметр оправки  $D$  может изменяться в зависимости от марки стали, толщины листов, способа термообработки и должен оговариваться в соответствующей НТД. При отсутствии специальных указаний диаметр оправки принимают равным двум толщинам основного металла. Радиус закругления опоры  $r$  для образцов типов XXVI, XXVIa, XXVII и XXVIIa выбирают по табл. 15. Для образцов типа XXVIII  $r = 25$  мм. Для образцов типа XXVIIIa радиус не установлен.

Если заданный угол изгиба превышает  $150^\circ$ , то после изгиба по схеме, приведенной на черт. 39, 40, 40а, изгиб можно продолжать между двумя параллельными нажимными плитами. Между концами образца устанавливают прокладку толщиной  $d$ , равной диаметру оправки (черт. 41). После удаления прокладки испытание проводят до соприкосновения сторон.

9.5. Испытания стыковых соединений труб на изгиб при поперечном (круговом) расположении шва проводят на образцах со снятым с наружной стороны утолщением.

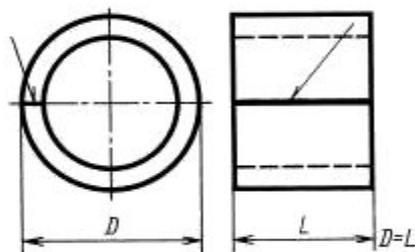
При диаметре трубы  $\leq 20$  мм применяют образцы в виде отрезков трубы.

При диаметре трубы свыше 20 до 45 мм применяют образцы в виде отрезка труб или плоские (сегментные) образцы.

При диаметре трубы свыше 45 мм применяют плоские (сегментные) образцы типов XXVII, XXVIIa и XXVIII; их размеры указаны в табл. 14. Образцы не выправляют. Форму их в поперечном сечении определяет естественная кривизна трубы.

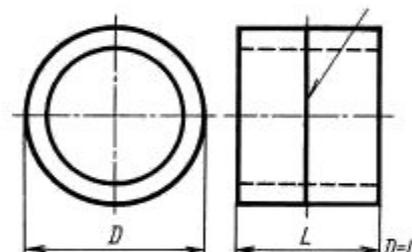
Испытание труб диаметром 60 мм и менее с поперечным (круговым) и продольным швами можно проводить на образцах, приведенных на черт. 42 или 43. Утолщение шва с наружной стороны трубы механическим путем снимают до уровня основного металла.

Тип XXIX

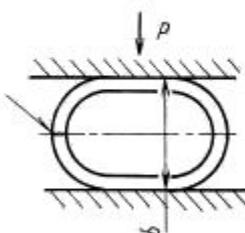


Черт. 42

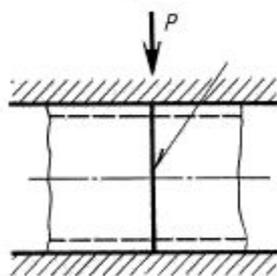
Тип XXX



Черт. 43



Черт. 44



Черт. 45

На образцах, вырезанных из труб, выполненных стыковой контактной сваркой, грат должен быть снят с наружной и внутренней сторон трубы до уровня основного металла.

**(Измененная редакция, Изм. № 2).**

9.6. Результаты испытания образцов типов XXIX и XXX определяют величиной  $b$  (черт. 44) при появлении на поверхности образца трещины. Характер трещины должен соответствовать указанному в п. 9.1

Если трещина не образуется, то испытание проводят до соприкосновения сторон.

**(Измененная редакция, Изм. № 2. 3)**

9.7. Испытание проводят путем деформации образца под прессом сжимающей нагрузкой.

Обязательным условием проведения испытания является плавность нарастания усилия на образец. Скорость испытания должна соответствовать п. 9.3.

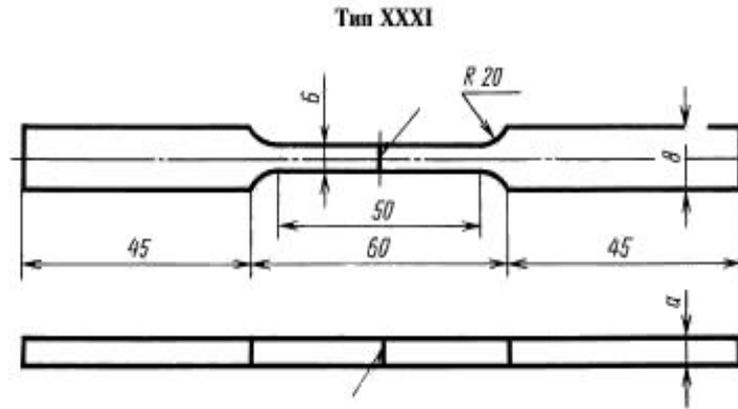
При испытании образцов с круговым швом последний располагают по оси приложения сжимающей нагрузки (черт. 45), а при испытании образца с продольным швом шов располагают в диаметральной плоскости, перпендикулярной действию сжимающей нагрузки (см. черт. 44).

Если в образце, предназначенном для испытания кругового шва, есть продольный шов, он должен располагаться вне растянутой зоны.

# ИСПЫТАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

10.1. Испытание на сопротивление ударному разрыву проводят для сварных стыковых соединений листов толщиной до 2 мм.

10.2. Форма и размеры образца должны соответствовать черт. 46. При испытании материалов высокой прочности разрешается изменять конструкцию захватной части образца.



Черт. 46

10.3. Испытание проводят на маятниковых копрах с приспособлением для закрепления плоских образцов. Удельную ударную работу  $a_v$  определяют по формуле

$$a_v = \frac{A_v}{V},$$

где  $A_v$  — работа удара, затраченная на разрыв образца, Дж (кгс · м);

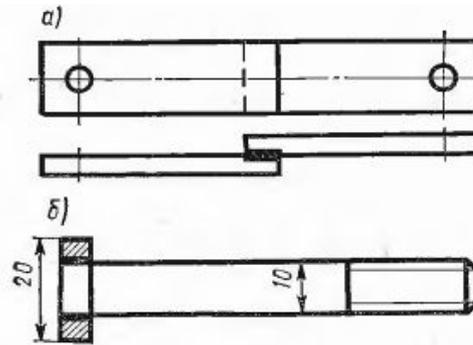
$V$  — объем расчетной части образца, равный произведению толщины основного металла ( $a$ ) на расчетную длину и ширину образца, см<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>).

Свойства **паяных** соединений определяют при ударном и статическом нагружениях по ГОСТ 23046-78 и ГОСТ 23047-78.

Статическую прочность на срез определяют на образцах соединений внахлестку (рисунок а) или на образцах паяных телескопических соединений (рис. б)

Рис. 3.8. Образцы для определения прочности паяных соединений:

а — соединение внахлестку; б — соединение по цилиндрической поверхности



Соединения внахлестку испытывают на ударный изгиб или ударный срез (рис. а, б). Паяные соединения встык испытывают на ударный изгиб, располагая ось надреза в плоскости спая (рис. в). В случае косоного расположения спая образец имеет форму (рис. г)

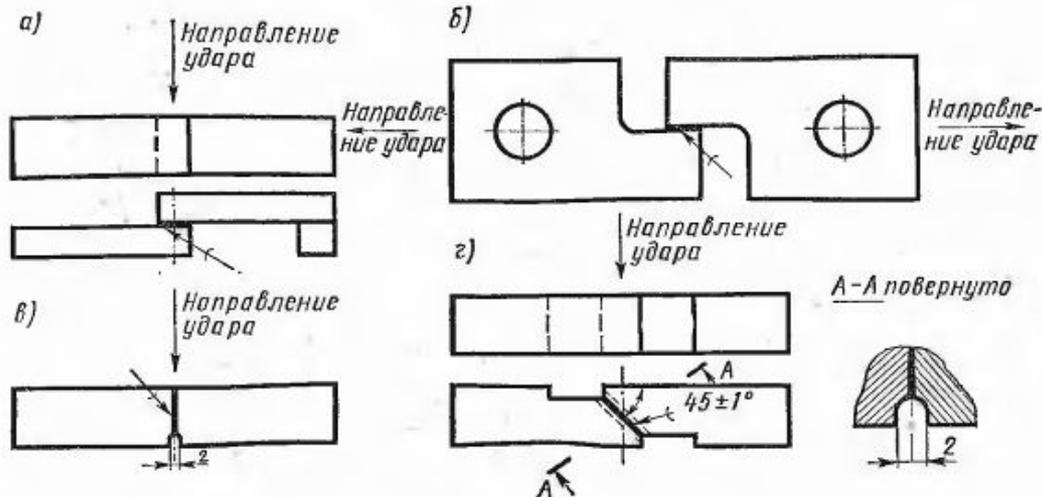


Рис. 3.9. Образцы для ударных испытаний паяных соединений:

а — на ударный изгиб; б — на ударный срез; в — на ударный изгиб для стыковых соединений; г — на ударный изгиб для косоных соединений

# МЕХАНИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ, ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ.

Сварное стыковое соединение в поперечном сечении имеет несколько участков, которые могут существенно различаться между собой по механическим свойствам (рисунок 1):

1 – шов;

2 – околошовная зона, материал которой часто претерпевает структурные превращения и может иметь повышенную прочность и твердость

3 – зона высокого отпуска, в которой у термически обработанных сталей прочность и твердость понижены в результате сварочного нагрева

4- зона нагрева до более низких температур, материал которой по-разному изменяет свои свойства в зависимости от марки стали.



Рисунок 1 – Стыковое сварное соединение

**Механическая неоднородность** – различие механических свойств металла в разных участках, соизмеримых с толщиной свариваемых элементов

Зоны, где металл обладает пониженным пределом текучести по отношению к пределу текучести соседнего участка металла, называют **МЯГКИМИ ПРОСЛОЙКАМИ**. Например, паяные стыковые соединения, припой в которых менее прочен, чем основной металл, содержат мягкую прослойку. Прочность таких соединений зависит от относительного размера мягкой прослойки  $X = \text{ширина прослойки} / \text{толщина металла}$ .

При сварке сталей участки ЗТВ нагреваются выше температуры  $A_{c3}$ , и претерпевая закалку, имеют большую прочность и твердость – **ТВЕРДЫЕ ПРОСЛОЙКИ**.

Необходимость изучения прослоек объясняется тем, что взаимодействие отдельных зон протекает сложным образом, и прочность сварного соединения, как правило, не совпадает с прочностью какой-либо прослойки.

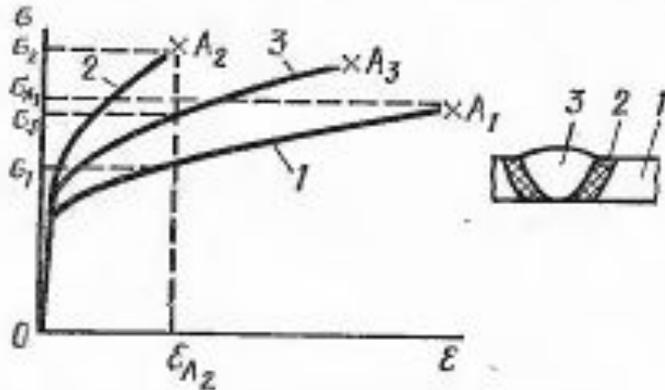


Рис. 3.13. Диаграммы зависимости напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для различных зон сварного соединения при растяжении вдоль шва:

1 — основной металл; 2 — зона термического влияния (твердая прослойка); 3 — шов

В случае, когда растягивающая сила направлена **вдоль шва** и все прослойки испытывают одинаковые деформации, деформационная способность соединения и его несущая способность ограничены пластичностью наименее пластичной прослойки. На рисунке т.  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  соответствуют разрушению образца из отдельной зоны. Разрушение наступит при  $\epsilon_{A_2}$ , при этом напряжения в основном металле  $\sigma_1$ , **в твердой прослойке**  $\sigma_2$  и шве  $\sigma_3$  будут сильно различаться.

Продольная растягивающая сила в основном воспринимается основным металлом, т.к. его площадь намного превосходит площади шва и прослойки. И хотя напряжения в твердой прослойке  $\sigma_2$  будут велики, средние напряжения будут близки к  $\sigma_1$ . Это означает, что прочность сварного соединения с твердой прослойкой, нагруженного вдоль шва, окажется ниже, чем прочность такого же элемента из основного металла. Отрицательное влияние. Твердой прослойки сказывается сильнее, если по длине шва встречаются концентраторы напряжений.

При действии силы **вдоль шва наличие мягких прослоек** практически не оказывает влияния на несущую способность из-за их малой площади.

## Работа мягкой прослойки при растяжении стыкового соединения поперек шва.

В упругой стадии нагружения мягкая прослойка и соседние участки деформируются однородно, и при достижении предела текучести МП в ней возникает пластическая деформация, а соседние участки остаются в упругом состоянии. При дальнейшем повышении нагрузки коэффициент Пуассона  $\mu$  МП будет стремиться к 0,5, а в упругих частях  $\mu = 0,3$ . Из-за неодинаковой поперечной деформации возникают касательные напряжения, (максимальные на плоскостях раздела), препятствующие поперечному сужению прослойки в направлении толщины листа.

В этом заключается причина повышения несущей способности (ЭФФЕКТ КОНТАКНОГО УПРОЧНЕНИЯ). Повышение разрушающей силы будет происходить пока соседние участки не начнут также пластически деформироваться. Временное сопротивление соединения с МП можно определить по формуле:

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{вмп}} * K_{\text{х}}$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – временное сопротивление металла МП;

$K_{\text{х}}$  – коэффициент контактного упрочнения в случае плоской деформации

$$K_{\text{х}} = (\pi + 1/\kappa) / (2\sqrt{3})$$

Если прослойка не идеально прямоугольная, как это бывает в сварных соединениях, то  $\kappa = F/s^2$ , где  $F$  — площадь поперечного сечения прослойки;  $s$  — толщина металла.

При испытании соединений с мягкой прослойкой на изгиб до разрушения разрушающий момент  $M_p$ , при котором появляются трещины в прослойке, не зависит от относительной ширины прослойки  $\lambda$ . Это можно объяснить тем, что разрушение при изгибе не связано с образованием шейки и изменением размеров поперечного сечения. Поэтому касательные напряжения, действующие вблизи границ мягкой прослойки, хотя и влияют на процесс пластической деформации во время нагружения, но не изменяют существенно толщины образца и его момента сопротивления. Разрушение наступает, когда максимальное напряжение в крайнем волокне достигает истинного разрушающего напряжения металла мягкой

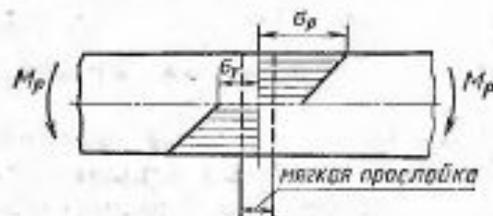


Рис. 3.15. Схематичное распределение напряжений при изгибе полосы с мягкой прослойкой



Рис. 3.16. Мягкая широкая прослойка в кольцевом шве цилиндрического сосуда, работающего под внутренним давлением  $p$

прослойки  $\sigma_p$ . Если принять, что зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  при  $\sigma > \sigma_T$  имеет линейный характер и к моменту разрушения эпюра напряжений в сечении выглядит, как показано на рис. 3.15, то разрушающий момент равен

$$M_p = W (\sigma_p + 0,5\sigma_T), \quad (3.17)$$

где  $W$  — момент сопротивления сечения;  $\sigma_T$  — предел текучести металла мягкой прослойки.

Получить равнопрочные сварные соединения из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов сложнее, чем из сталей. Во многих случаях соединения из этих сплавов оказываются неравнопрочными с основным металлом.

**Алюминиевые сплавы.** На механические свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов оказывают существенное влияние степень защиты зоны расплавленного металла от воздуха, количество содержащихся в защитном инертном газе примесей кислорода и азота, состав присадочной проволоки, степень очистки

основного металла и присадочной проволоки от окислов и загрязнений, способ сварки, толщина металла.

Для сплавов невысокой прочности, а также для сплавов, находящихся в ненаклепанном состоянии, предел прочности сварных соединений приближается к пределу прочности основного металла.

Некоторые алюминиевые сплавы свариваются, будучи в наклепанном состоянии. Термическое воздействие сварки снимает наклеп в широкой зоне, вследствие чего прочность таких соединений оказывается на уровне отожженных и горячекатаных сплавов (рис. 3.18). Восстановить прочность таких соединений можно только

за счет пластической деформации металла специальной прокаткой роликом сварных соединений.

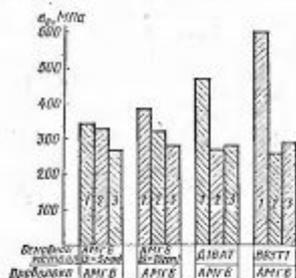


Рис. 3.18. Предел прочности сварных соединений алюминиевых сплавов:

1 — основной металл; 2 — сварные соединения с усилением; 3 — то же, без усиления

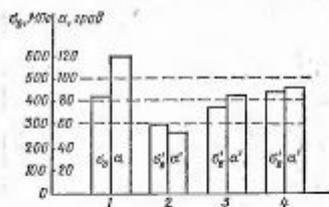


Рис. 3.19. Изменение прочности и пластичности сварных соединений из сплава Д20 в зависимости от вида термической обработки:

1 — основной металл; 2 — закалка — старение — сварка; 3 — закалка — старение — сварка; 4 — старение — сварка

В алюминиевых сплавах, которые в исходном состоянии термически упрочнены, соединения после сварки существенно уступают по прочности основному металлу. Термической обработкой и старением удается заметно повысить прочность сварных соединений и приблизиться к уровню прочности основного металла (рис. 3.19). После полной термической обработки сплава Д20 прочность сварного соединения составляет 90—95 % от прочности основного металла. В соединениях из разнородных сплавов прочность зависит от менее прочного сплава и присадочного металла.

Большинство алюминиевых сплавов хорошо свариваются контактной сваркой. Современное оборудование и технология обеспечивают соединение деталей из алюминиевых сплавов малой и средней толщины (рис. 3.20). Прочность на отрыв из-за высокой концентрации напряжений заметно ниже прочности на срез.

**Магниевые сплавы.** Прочность сварных соединений магниевых сплавов также составляет 70—100 % от прочности основного металла.

Примерно равнопрочными основному металлу оказываются соединения из термически неупрочняемых магниевых сплавов типа МА2-1. Для других сплавов прочность соединений может быть повышена применением присадочных материалов, измельчающих структуру металла шва, например с добавками редкоземельных элементов, а также термической обработкой. Уровень прочности и пластичности сварных соединений некоторых магниевых сплавов показан на рис. 3.21.

**Титановые сплавы.** Предел прочности титановых сплавов в зависимости от легирования и термической обработки в основном колеблется от 500 до 1300 МПа. Для большинства титановых сплавов средней прочности характерна относительно невысокая пластичность по углу загиба ( $\alpha \leq 80 + 100^\circ$ ) и относительному удлинению ( $\delta_s = 8 + 15\%$ ).

Прочность сварных соединений, как правило, близка к прочности основного металла. Пластичность сварных соединений зависит от состава и структуры шва, а также от характера структурных превращений в околошовной зоне под влиянием термического цикла сварки. Литая структура шва понижает его пластичность, но ее можно повысить соответствующим выбором присадочного металла и последующей термической обработкой: отжигом, закалкой со старением, неполным отжигом для снижения остаточных напряжений. Пластичность околошовной зоны существенно зависит от структуры сплава. Сплавы с  $\alpha$ -структурой (BT1, BT5), не изменяющие ее при сварке, а также сплавы с небольшим содержанием  $\beta$ -фазы (OT4, BT4, BT20, AT2, AT3, AT4) имеют после сварки достаточную пластичность сварного соединения. Мартенситные титановые сплавы (BT6, BT14, BT3-1) после сварки имеют низкую пластичность и подвергаются отжигу.

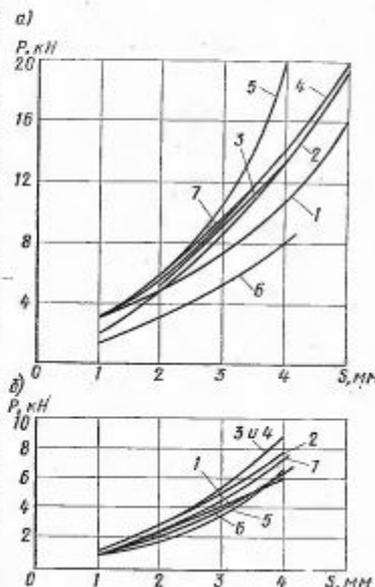


Рис. 3.20. Разрушающие усилия  $P$  на срез (а) и на отрыв (б) для сварных точечных соединений в зависимости от толщины металла  $\delta$

1 — АМг2; 2 — АМг3; 3 — АМг5; 4 — АМг6; 5 — АМг1; 6 — Д16АМ, Д20АМ; 7 — Д16АТ, BT5T1

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

**КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?**