

**Свариваемость – это технологическое свойство материала** образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструкционным и эксплуатационным требованиям к ним. При наличии большого разнообразия вышерассмотренных методов сварки, очевидно, что имеется возможность получения сварных соединений большинства материалов. Однако, учитывая, что свойства материалов при сварке могут значительно изменяться, свариваемость является важной комплексной характеристикой материала, помогающей правильно вы-

брать материал, метод, режимы сварки. При оценке свариваемости сплава учитывают степень изменения химического состава и возможность изменения распределения элементов в сварном шве; влияние нагрева на структуру и механические свойства основного материала в околошовной зоне; деформации напряжения и перемещения, связанные со сварочным процессом; возможность образования горячих и холодных трещин в материале шва и околошовной зоне. Дадим краткую характеристику основным группам сплавов, применяемым в машиностроении. Для сталей основным показателем свариваемости является эквивалентное содержание углерода  $S_{э}$ , при расчёте которого учитывается содержание основных легирующих элементов.

$C\ C\ Mn\ Cr\ V\ Mo\ Ni\ P\ э = + + + + + .$

**Низкоуглеродистые стали  $S_{э} \leq 0,3\ %$**  свариваются хорошо.

**Среднеуглеродистые и легированные с  $S_{э} > 0,3\ %$**  закаливаются в зоне термического влияния (ЗТВ) в результате резкого охлаждения зоны шва прилегающими слоями холодного металла. Поэтому желательно подогревать заготовки перед сваркой до 100 ... 300 °С, чтобы уменьшить скорость охлаждения и возможность образования закалочных структур. Для низколегированных и среднелегированных сталей возможно образование трещин. Основными методами сварки таких сталей является сварка в углекислом газе, аргоне, сварка под флюсом, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая.

**Высоколегированные коррозионностойкие стали ( $S_{э} > 10\ %$ )** склонны к образованию хрупких структур и резкому разупрочнению зоны шва. Для восстановления первоначальной структуры требуется термообработка (нормализация и (или) отпуск). Для сталей с

аустенитной структурой для уменьшения вредных последствий применяется сварка плавлением на малых энергиях с теплоотводящими подкладками + закалка в воде с 1100 °С (для фиксации аустенитной структуры). Эти стали хорошо варятся контактной сваркой.

**Чугун** варится плохо. Сварку проводят только при ремонте и заварке дефектов. В результате быстрого нагрева возможно образование белого чугуна в шве, а зона термовлияния может закаливаться. Для устранения этих дефектов производят сварку с предварительным подогревом до 400 ... 700 °С (горячая сварка). Используются чугунные электроды  $d = 8 \dots 25$  мм со специальным покрытием. Для предупреждения появления закалочных структур и снижения остаточных напряжений производят медленное охлаждение вместе с печью. За-

щиту шва от окисления производят флюсом на основе буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). В некоторых случаях при заварке малых дефектов используется холодная сварка стальными, медножелезными, медно-никелевыми электродами.

**Медь и ее сплавы** трудно свариваются, т. к. расплавленная медь легко окисляется и по границам зерен образуется легкоплавкая эвтектика  $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ , которая дает хрупкость (горячие трещины). Сплавы активно насыщаются водородом  $\text{H}_2$ , дающим водородную хрупкость, что приводит к образованию холодных трещин. Высокая теплопроводность требует концентрированного подвода энергии и подогрева. Большая усадка медных сплавов приводит к значительному короблению. Повышенная жидкотекучесть затрудняет оформление наклонных, вертикальных и потолочных швов. Учитывая вышеназванные особенности медных сплавов, рекомендуется их сваривать в защитных газах. Режим выбирается с повышенной плотностью энергии из-за высокой теплопроводности, при толщине  $\delta > 10$  мм сварку ведут с подогревом до 300 °С, при  $\delta > 30$  мм – применяется плазменная сварка, флюс на основе буры, при  $\delta > 50$  мм используется электрошлаковая сварка. Контактной сваркой медные сплавы не свариваются, так как имеют малое электрическое сопротивление и в зоне контакта не происходит нагрева. При сварке латуни испаряется основной компонент  $\text{Zn}$ . Его пары токсичны, поэтому следует обеспечивать интенсивную вытяжную вентиляцию из зоны сварки. Для обеспечения хорошего качества шва следует сварить латунь в защитных газах или под слоем флюса. Бронзы сваривают как медь, кроме оловянистых, которые сваривают с большой скоростью и без подогрева, чтоб не выплавилось олово.

**Алюминий и его сплавы.** Сварку затрудняет образование плотной окисной плёнки  $Al_2O_3$ , имеющей очень высокую температуру плавления порядка  $2050\text{ }^\circ\text{C}$ . Для защиты от окисления сварку производят в атмосфере защитных газов или со спецфлюсами, растворяющими  $Al_2O_3$ :  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $LiF$ ,  $CaF_2$ . Можно очистить поверхность от оксида щелочью  $NaOH$ . Алюминиевые сплавы склонны к образованию газовой пористости под действием водорода, попадающего в зону шва из влажных материалов и оксидной плёнки. Трудно варятся дуралюмины. Рекомендуется сварка неплавящимся электродом при  $\delta = 0,5 \dots 10\text{ мм}$  и

плавящимся при  $\delta > 10\text{ мм}$  в защитных газах. При сварке нужна большая тепловая мощность, т. к. сплавы алюминия имеют высокую теплопроводность. Чистый алюминий хорошо сваривается холодной сваркой. **Тугоплавкие металлы и сплавы** ( $Ti$ ,  $Zr$ ,  $Mo$ ,  $Nb$ ) имеют температуру плавления  $2500\dots 3000\text{ }^\circ\text{C}$ . При нагреве интенсивно поглощают газы, что резко снижает их пластичность.  $Zr$  и  $Ti$  варят в аргоне, перед сваркой проволоку и основной металл дегазируют путем отжига в вакууме.  $Mo$  и  $Nb$  варят в аргоне или электронно-лучевой сваркой в вакууме. **Дефекты сварных**

**соединений:** непровар, неполный шов, пережог, прожог, пористость, трещины, раковины, наплывы. **Контроль сварных соединений:** предварительный контроль материалов, контроль режимов сварки, внешний осмотр, рентгеноскопия,  $\gamma$ -излучением, ультразвуковой, магнитный и люминесцентный контроль, механические испытания (растяжение образцов, вырезанных из сварного шва и зоны термовлияния, неразрушающие испытания твердомером), металлографические исследо-

вания, гидравлические или пневматические испытания, керосиновая проба на

герметичность (другая сторона шва покрывается мелом), окончательный кон-

троль изделий.

## 11.2. Пайка

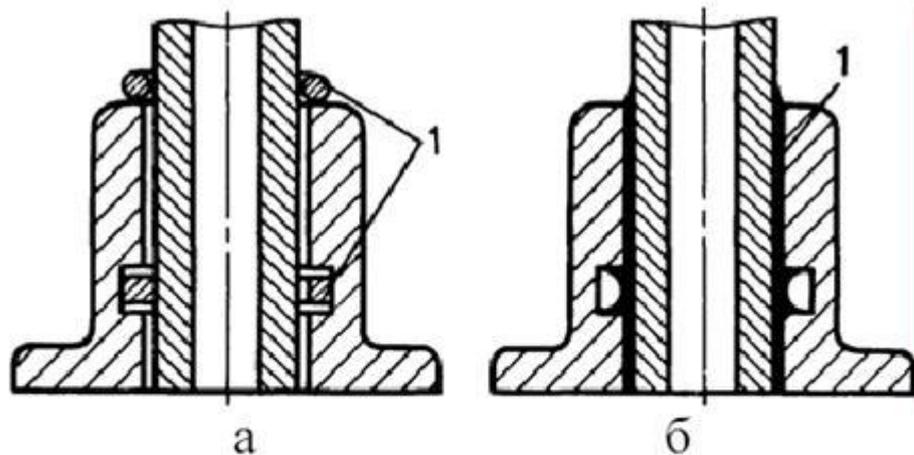


Рис. 11.5. Схема капиллярной пайки:  
а – перед пайкой; б – после пайки;  
1 – припой

**Пайка** – это соединение деталей без их расплавления с помощью припоя, температура плавления которого ниже, чем у основного металла (рис. 11.5). Поверхности предварительно очищают, обезжиривают, удаляют оксиды, применяют флюсы либо защитные газы.

Применяется пайка в печи, в индукторе, погружением в расплав припоя, радиационный нагрев кварцевыми лампами, электронным или лазерным лучом, газопламенными горелками, паяльниками и паяльными лампами. Припои подразделяются на твёрдые (тугоплавкие и достаточно прочные  $T_{пл}$  выше  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma \leq 700\text{ МПа}$ ) и мягкие, имеющие меньшую температуру плавления и меньшую прочность. Твёрдые припои изготавливают на основе Cu, Ag,

Al, Mg, Ni. Они широко применяются для соединения меди, латуни, бронзы, стали, чугуна и др. сплавов. Флюсы: бура, борная кислота, плавиковый шпат и хлористые металлы. Мягкие припои изготавливают на основе Sn, Pd, Kd, Wi, Zn. Они обеспечивают прочность  $\sigma \leq 100\text{ МПа}$ . Для них используются флюсы: канифоль,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (нашатырь),  $\text{ZnCl}$  (травленая соляная кислота). Флюсы при пайке защищают место спая от окисления, обеспечивают смачиваемость припоем и растворяют окисную пленку. Для пайки тугоплавких металлов разработа-

ны тугоплавкие припои на основе никеля, титана, палладия. Основные припои: оловянно-свинцовые ( $t = 210 \dots 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), медно-цинковые ( $t = 800 \dots 890\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), медно-фосфористые ( $t = 750 \dots 869\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), серебряные ( $t = 600 \dots$

...  $875\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

# Свариваемость металла и методы ее оценки

**Свариваемость** — свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. Следовательно, свариваемость зависит, с одной стороны, от особенностей материала, технологии сварки и конструктивного оформления соединений, а с другой — от необходимых эксплуатационных свойств сварной конструкции. Последние определяются техническими требованиями, предъявляемыми к таким конструкциям.

Свариваемость материалов считается достаточной, если требования к эксплуатационным свойствам сварных соединений с принятыми допущениями удовлетворяются, и недостаточной, если не обеспечивается минимальный уровень хотя бы одного из эксплуатационных свойств сварного соединения. Различают свариваемость физическую и технологическую.

**Физическая свариваемость** определяет принципиальную возможность получения монолитных сварных соединений, что особенно важно при сварке разнородных материалов.

**Технологическая свариваемость** представляет собой реакцию материала на сварочный термомодеформационный цикл и металлургическое воздействие сварки, которая оценивается, например, посредством сравнения механических свойств металла сварного соединения с одноименными свойствами основного металла.

**При оценке свариваемости учитывают** также стойкость металла к образованию трещин и его специальные свойства (коррозионную стойкость, прочность при высоких или низких температурах, сопротивление хрупкому разрушению).

**Свариваемость углеродистых сталей** определяется, в первую очередь, содержанием в них углерода. Под хорошей свариваемостью низкоуглеродистой стали, предназначенной для изготовления конструкций, работающих при статических нагрузках, понимают возможность с использованием обычной технологии получить сварное соединение, равнопрочное основному металлу, без трещин в металле шва и снижения пластичности в околошовной зоне. При этом металлы шва и околошовной зоны должны быть стойкими к переходу в хрупкое состояние при температуре эксплуатации конструкции и наличии концентраторов напряжений, обусловленных формой сварного узла.

**Свариваемость материала оценивается** посредством сравнения его свойств со свойствами ранее применявшихся материалов или основного металла. Свариваемость признают удовлетворительной, если результаты испытаний различных свойств сварного соединения соответствует нормативам, установленным техническими условиями на данную продукцию.

**Стойкость металла сварного соединения к образованию горячих трещин** — это наиболее важный показатель свариваемости, так как при сварке сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации под действием возникающих при затвердевании растягивающих напряжений возможно появление горячих трещин, являющихся весьма серьезным дефектом.

**Стойкость металла сварного соединения к образованию холодных трещин** — это также очень важный показатель свариваемости, поскольку под действием сварочного нагрева изменяется структура основного металла. При этом в околошовной зоне закаливаемых сплавов в результате фазовых превращений образуются хрупкие структуры типа мартенситных, что может привести к появлению холодных трещин.

Процессы, происходящие в металле сварного соединения, могут вызвать хрупкие разрушения сварной конструкции. Причинами таких разрушений могут быть конструктивные недостатки, наличие макроскопических концентраторов напряжений, дефектов сварных соединений (раковин, пор, шлаковых включений, подрезов по краю швов), микротрещин и полостей.

**Склонность металла сварного соединения к хрупкому разрушению** — это также достаточно важный показатель свариваемости. Оценивают ее посредством специальных испытаний по сравнению со склонностью к хрупкому разрушению основного металла, зоны термического влияния и металла сварного шва. Считается, что лучшей свариваемостью обладают те металлы, сварные соединения которых не отличаются по склонности к хрупкому разрушению от основного металла.

**Методы определения показателей свариваемости материалов подразделяются на прямые** — при использовании которых выполняют сварку образцов заданной формы по выбранной технологии, **и косвенные** — основанные на замене сварочного процесса имитирующим его процессом.

Определение стойкости металла к образованию горячих трещин. Стойкость сварного соединения металла к образования горячих трещин определяют по результатам следующих испытаний:

машинных испытаний, основанных на принудительном деформировании образцов, подвергнутых сварочному нагреву, в температурном интервале возникновения горячих трещин;

технологических испытаний, или сварки проб, при проведении которых условия деформирования в температурном интервале образования горячих трещин регулируют выбором формы и размеров образцов, а также последовательности выполнения сварных швов и режимов сварки.

**Машинные испытания заключаются** в испытаниях образцов, проплавленных сварочной дугой, на растяжение и изгиб, а образцов, нагреваемых по сварочному циклу, — на растяжение. Для машинных испытаний применяют специальные установки.

**Процедура машинных испытаний** включает в себя сварку серии образцов с одновременным деформированием шва при разной скорости перемещения активного захвата и определение критической скорости деформирования, вызывающей появление горячих трещин в нескольких образцах.

**Технологические испытания** основываются на положении о том, что металл, в котором не возникает трещин в искусственно созданных жестких условиях (что достигается выбором форм и размеров специальных технологических проб и типов их закрепления), не должен разрушаться и в реальных изделиях. При сварке кристаллизующийся металл подвергается деформации вследствие усадки шва и формоизменения технологических проб. Специальная конструкция и технология сварки проб обуславливают повышенные темпы высокотемпературной деформации.

**Технологические пробы** можно условно подразделить на два класса: количественные и качественные.

**К количественным** относятся технологические пробы, в которых образование горячих трещин можно связать с каким-либо конструктивным параметром (размерами пробы, глубиной или расположением надрезов и др.) или параметром режима сварки (скорость, температура подогрева). Сравнив такие пробы, можно выделить сплавы с меньшим и бóльшим сопротивлением образованию горячих трещин.

**Качественные технологические пробы** предусматривают выполнение сварных швов на образцах постоянной формы в строго заданной последовательности и при соблюдении определенных режимов сварки. Сопротивление металла шва образованию горячих трещин оценивают в этом случае по их наличию или отсутствию на поверхности проб и шлифов или в изломах сварных швов. Качественные пробы не позволяют оценить количественно

стойкость сплавов к образованию горячих трещин и предназначены лишь для отбраковки плохо сваривающихся сплавов.

### **Для определения стойкости металла к образованию горячих трещин используют различные виды проб.**

**Составная тонколистовая проба** содержит несколько пластин разной ширины, соединенных с одной стороны прихватками. Сварку производят в направлении расширения пластин. При этом в местах пересечения стыков пластин сварным швом образуются горячие трещины. Показателем стойкости металла шва к образованию горячих трещин служит минимальная (критическая) ширина пластины, при сварке которой горячие трещины не возникают: чем меньше критическая ширина пластины, тем больше стойкость металла шва.

**Проба ИМЕТ** из тонколистового металла представляет собой пластину с постоянными размерами и надрезом, параллельным ее короткой стороне. Пластины проплавляют вольфрамовым электродом в струе аргона или электронным лучом таким образом, чтобы ось шва проходила через вершину надреза. Вероятность появления трещины от надреза зависит от его положения на пластине: чем больше длина шва до надреза, тем выше стойкость металла шва к образованию горячих трещин.

**Проба Хоулдрокфта («рыбья кость»)** используется для оценки сопротивления металла шва образованию горячих трещин при сварке тонких листов легированных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов. Данная проба представляет собой пластину с боковыми прорезями увеличивающейся длины. При испытании выполняют наплавку или проплавляют пластину вольфрамовым электродом в защитном газе. Критерием оценки стойкости металла служит длина горячей трещины.

**Крестовидная тонколистовая проба** применяется для определения склонности к образованию горячих трещин главным образом алюминиевых и магниевых сплавов. Две прямоугольные пластины сваривают друг с другом четырьмя валиковыми швами в определенной последовательности и направлениях. Критерием наличия склонности к появлению горячих трещин служит отношение длины швов с трещинами к общей длине швов.

**Кольцевая сегментная проба** для испытания листов большой толщины состоит из четырех заготовок с шлифованными торцевыми поверхностями, свариваемых друг с другом с двух сторон. Размеры такой пробы после сборки составляют 90 × 90 × 25 мм. На ее верхней стороне протачивают кольцевую канавку. При испытании пробу сваривают по канавке по ходу часовой стрелки. После ее охлаждения до температуры ниже 50 °С выполняют замыкающий шов. Горячие трещины образуются в местах стыка заготовок и

распространяются вдоль сварного шва. Критерием стойкости металла шва к образованию горячих трещин служит процентное отношение суммарной длины образовавшихся трещин к длине шва.

Пробу с канавками изготавливают из пластин толщиной более

40 мм. При толщине пластины менее 60 мм ее приваривают к жесткой плите по флангам швом с катетом 20 мм, а канавки располагают с шагом 100 мм. При толщине пластины более 60 мм канавки выполняют с двух сторон образца, а пластины сваривают по канавкам с минимальной скоростью. Склонность к образованию горячих трещин в этом случае определяют по отношению суммарной длины образовавшихся трещин или их площади соответственно к длине или площади поперечного сечения шва, а также по коэффициенту периодичности — числу трещин на единице длины шва. При отсутствии горячих трещин в швах, выполненных на рекомендованных для анализа режимах сварки, переходят к сварке более узких образцов либо к сварке с повышенной скоростью.

Способы оценки склонности металла к образованию холодных трещин. Все способы оценки склонности (стойкости, сопротивления) металла сварного соединения к образованию холодных трещин подразделяются следующим образом. По операции оценки различают косвенные и прямые способы, по форме представления показателей — количественные, полуколичественные и качественные, по варианту использования результатов оценки — сравнительные и прикладные.

**Косвенные способы позволяют** оценить склонность сварного соединения к образованию холодных трещин посредством расчета без непосредственного испытания материалов.

**Прямые способы оценки склонности** к образованию холодных трещин предусматривают сварку технологических проб и проведение специализированных испытаний сварных соединений или основного материала, подлежащего сварке, в условиях, имитирующих сварочные.

**Количественные способы оценки** склонности к образованию холодных трещин обеспечивают получение числового значения показателя, связанного с изменением одного из факторов, обеспечивающих контроль этого процесса.

**Качественные способы не обеспечивают** количественной оценки склонности к образованию холодных трещин и по существу служат для отбраковки материалов.

Способы оценки, которые могут использоваться только для сопоставления материалов и технологических вариантов сварки в целях выбора лучших из них, относятся к сравнительным.

Способы, позволяющие оценить стойкость реальных сварных конструкций к образованию холодных трещин, относятся к прикладным.

По тем же признакам подразделяются и технологические пробы. Пробы отраслевого назначения, или прикладные, позволяют оценить склонность материалов к образованию холодных трещин в условиях, максимально приближенных к технологическим и климатическим условиям изготовления реальных сварных конструкций.

**Проба «Геккен»** представляет собой плоский прямоугольный образец толщиной 12 ... 40 мм, имеющий в центре продольную прорезь с V-образной разделкой. Этот образец заваривается в свободном состоянии и затем выдерживается в течение 20 ч. Сварку выполняют вручную покрытыми электродами, под флюсом или в защитных газах. При этом трещины образуются в корневой части сварного соединения. Обязательное условие пробы — наличие в корне шва непровара, служащего концентратором напряжений. Количественным показателем стойкости к образованию холодных трещин в этом случае могут служить процентное отношение суммарной длины трещин к длине шва; процентное отношение площади трещин к площади сечения шва, температура подогрева, при которой не образуются трещины.

**Крестовая проба** состоит из трех пластин, собранных в крестовидное соединение. Все поверхности касания этих пластин предварительно шлифуются для обеспечения хорошего контакта. На пробе выполняют четыре угловых шва длиной 160 мм в определенной последовательности. Температура пробы перед сваркой очередного шва не должна превышать  $(28 \pm 3)^\circ\text{C}$ . Через 48 ч после сварки для снятия напряжений производится двухчасовой отжиг пробы при температуре 595 ... 650 °C. Пробу разрезают на поперечные темплеты для изготовления микрошлифов и выявления трещин в околошовной зоне. Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если на двух первых темплетях не обнаружено ни одной трещины.

**Лихайская модифицированная проба** состоит из образцов с прорезями, завариваемыми на разных режимах при различных температурах предварительного подогрева. При этом начало и концы прорезей образцов (по 2 ... 3 мм) оставляют незаплавленными. Наличие трещин на поверхности сварного соединения, в корне шва и поперечном сечении выявляют через 24 ч после окончания сварки. Для оценки склонности материала к образованию холодных трещин определяют процентную долю разрушений сварных соединений в зависимости от скорости охлаждения металла с температурой 300 °C или от продолжительности его охлаждения в температурном интервале 800 ... 300 °C. Скорость охлаждения, при превышении которой

разрушение швов заметно усиливается, принимается в качестве критерия оценки сопротивления материала образованию холодных трещин. Также оценку можно производить и по критическому времени охлаждения материала или по минимальной температуре предварительного нагрева, необходимой для устранения холодных трещин.

Оценка влияния термического цикла сварки на изменение структуры и свойств свариваемых металлов. Предварительную оценку в этом случае выполняют по методикам, предусматривающим нагрев и охлаждение образцов по программе с заданными скоростями и механические испытания на любом этапе термической обработки. Такие испытания позволяют имитировать сварочные термические циклы любого участка сварного соединения и выявлять их воздействие на структуру и свойства металла. Для этой же цели используют и специальные технологические пробы, например валиковую. Для такой пробы на пластины металла толщиной 14 ... 30 мм наплавляют валики на режимах с разной погонной энергией. Из пластин вырезают поперечные образцы для определения структуры и твердости, а также для испытаний на ударный и статический изгиб.

Расчетная оценка свариваемости конструкционных сталей по химическому составу выполняется следующим образом. Технологическая свариваемость металлов и их сплавов зависит от ряда факторов: их химической активности, степени легирования, содержания примесей и особенностей структуры. Чем выше химическая активность металла, тем больше его склонность к взаимодействию с окружающей средой и в первую очередь к окислению, а следовательно, требуется более эффективная его защита и металлургическая обработка при сварке. Защита расплавленных сталей и сплавов на основе железа от взаимодействия с воздухом обеспечивается с помощью электродных покрытий, флюсов и инертных газов.

Наибольшее влияние на свариваемость сталей оказывает углерод: при увеличении содержания углерода и ряда других легирующих элементов их свариваемость ухудшается.

Ориентировочным количественным показателем свариваемости стали является эквивалент углерода, рассчитываемый по формуле

$$С_{э\text{кв}} = C + Mn/6 + Si/24 \quad (1)$$

в которой содержание углерода и легирующих элементов выражено в процентах.

В зависимости от эквивалента углерода (и связанной с этой величиной склонности материала к закалке и образованию трещин) все конструкционные стали подразделяются на четыре группы

соответственно с хорошей, удовлетворительной, ограниченной и плохой свариваемостью.

Стали с Сэкв < 0,25 % хорошо свариваются без образования закалочных структур и трещин в широком диапазоне режимов, толщин и конструктивных форм.

Стали с Сэкв = 0,25 ... 0,35 % свариваются удовлетворительно. Они не склонны к образованию холодных трещин при правильном выборе режимов сварки, однако в ряде случаев необходим их подогрев.

Стали с Сэкв = 0,36 ... 0,45 % свариваются ограниченно с образованием трещин. Возможность регулирования сопротивления этих сталей образованию трещин посредством изменения режимов сварки ограничена, а следовательно, требуется их подогрев.

Стали с Сэкв > 0,45 % плохо свариваются. Они весьма склонны к закалке и возникновению холодных трещин. При сварке необходим их подогрев и применение специальных технологических приемов, а после сварки требуется термическая обработка.

## **ЗАДАНИЕ :**