

Раздел 1. СВАРИВАЕМОСТЬ (ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ).

1.2 Маркировка сталей

Сталь является наиболее распространенным материалом при производстве сварных конструкций. Она представляет собой сплав железа с углеродом и другими элементами. Углеродистые стали подразделяются на низко- (содержание углерода до 0,3 %), средне- (0,25-0,6 %) и высокоуглеродистые (более 0,6 % C). В марках стали с помощью букв и цифр указывают их характеристики. Цифра после букв Ст (сталь) обозначает условный порядковый номер марки (от 0 до 7). Она зависит от химического состава и механических свойств стали. Буквой Г маркируют углеродистые стали с повышенным содержанием марганца. Иногда последние цифры в марке (от 1 до 4) указывают условный номер категории сталей. Индексы «КП» (кипящая), «ПС» (полуспокойная), «СП» (спокойная) характеризуют степень раскисления стали.

Кипящая сталь отличается высокой степенью неравномерности распределения вредных примесей по толщине проката и получается при неполном раскислении металла марганцем. Эта сталь склонна к старению и образованию кристаллизационных трещин в металле шва и ЗТВ.

Спокойная сталь получается при достаточно глубоком раскислении металла и равномерном распределении примесей. Она менее склонна к старению и меньше реагирует на термический цикл сварки.

Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной.

В промышленности наиболее востребованы углеродистые стали по ДСТУ 2651-94 (ГОСТ 380-94) типа С, Ст3, Ст4, 10, 25 и т. д. (до 70 % всего проката, а также поковки, крепежные детали и другие изделия). В производстве сварных конструкций наиболее востребована низкоуглеродистая сталь (до 0,22 % углерода) марки Ст3 различных степеней раскисления. Используют также сталь марки Ст3Гпс с повышенным содержанием марганца (до 1,2 %). Стали этих марок для сварных конструкций поставляются с учетом требований к механическим свойствам и химическому составу, заложенному в ГОСТе.

Согласно ГОСТу 1050-88 повышенные требования предъявляются к механическим свойствам и химическому составу углеродистых сталей. К этой группе можно отнести стали 05, 09, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 60 и др. В них двухзначные цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента. Стали 05кп, 08, 08кп, 10, 10 кп, 15, 20 и 25 хорошо свариваются. Остальные стали этой группы свариваются значительно хуже.

Для повышения эксплуатационных свойств сталей в них вводятся легирующие элементы (суммарное содержание до 2,5 %). Такие стали называются низколегированными. Они изготавливаются по ГОСТ 19281-89 «Прокат из сталей повышенной прочности. Общие технические условия», а также по ТУ. Химические элементы, используемые для легирования сталей, обозначают следующим образом:

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Алюминий	Ю	Марганец	Г
Азот	А	Медь	Д
Бор	Р	Никель	Н
Ванадий	Ф	Ниобий	Б
Вольфрам	В	Селен	Е
Кобальт	К	Титан	Т
Кремний	С	Хром	Х
Молибден	М	Цирконий	Ц

В странах СНГ принята буквенно-цифровая маркировка легированных сталей, в которой первые две цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента, буквы — наименование соответствующего элемента, цифры после букв — содержание элемента в процентах. Отсутствие цифры после буквы означает, что содержание элемента менее 1 %. Буква А в конце марки означает «Высококачественная сталь».

Горячекатаную (ГОСТ 5781-82) и стержневую арматурную сталь с термомеханическим и механическим упрочнением периодического профиля (ГОСТ 10884-81) выпускают для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций.

Сталь низколегированную конструкционную для мостостроения изготавливают (с гарантией свариваемости) следующих марок: 16Д, 15ХСНД, 10ХСНД. Сталь последних двух марок выпускают без термообработки, в нормализованном и термически улучшенном состоянии. Химический состав углеродистых и ряда низколегированных сталей, а также их механические свойства приведены в приложении (см. табл. П1-П5).

Стали с особыми свойствами производятся по различным стандартам и техническим условиям. Химический состав основных марок этих сталей, а также их зарубежных аналогов приведен в приложении.

Классификация сталей по свариваемости

При оценке свариваемости роль химического состава стали является преобладающей. По этому показателю в первом приближении

проводят оценку свариваемости. Влияние основных легирующих примесей на свариваемость сталей можно описать следующим образом.

Углерод — одна из наиболее важных примесей, определяющих прочность, пластичность, закаливаемость и другие важные характеристики стали. Содержание углерода в конструкционных сталях до 0,25 % не снижает свариваемости. Более высокое содержание приводит к образованию закалочных структур в металле ЗТВ и появлению трещин.

Сера и фосфор — вредные примеси. Повышенное содержание серы приводит к образованию горячих трещин, а фосфора вызывает хладноломкость. Поэтому содержание серы и фосфора в низкоуглеродистых сталях ограничивают соответственно до 0,05 и 0,04 %.

Кремний присутствует в стали как примесь в количестве до 0,3 % в качестве раскислителя. При таком содержании он не ухудшает свариваемость сталей. В качестве легирующего элемента при содержании его в стали до 0,8-1 % (особенно до 1,5 %) возможно образование тугоплавких оксидов кремния, ухудшающих свариваемость.

Марганец при содержании в стали до 1,0 % не затрудняет процесс сварки. При сварке сталей, содержащих марганец в количестве 1,8-2,5 %, возможно появление закалочных структур в металле ЗТВ и, следовательно, трещин.

Хром в низкоуглеродистых сталях ограничивается как примесь в количестве до 0,3 %. В низколегированных сталях возможно содержание хрома в пределах 0,7-3,5 %. В легированных сталях его содержание колеблется от 12 до 18 %, а в высоколегированных сталях достигает 35 %. При сварке хром образует карбиды, ухудшающие коррозионную стойкость стали. Хром способствует образованию тугоплавких оксидов, затрудняющих процесс сварки.

Никель аналогично хрому содержится в низкоуглеродистых сталях в количестве до 0,3 %. В низколегированных сталях его содержание возрастает до 5, а в высоколегированных — до 35 %. В сплавах на никелевой основе его содержание является преобладающим. Никель увеличивает прочностные и пластические свойства стали, оказывает положительное влияние на свариваемость.

Ванадий в легированных сталях содержится в количестве 0,2- 0,8 %. Он повышает вязкость и пластичность стали, улучшает ее структуру, способствует повышению прокаливаемости.

Молибден в сталях ограничивается 0,8 %. При таком содержании он положительно влияет на прочностные показатели сталей и измельчает ее

структуру. Однако при сварке он выгорает и способствует образованию трещин в наплавленном металле.

Титан и ниобий в коррозионностойких и жаропрочных сталях содержатся в количестве до 1 %. Они снижают чувствительность стали к межкристаллитной коррозии, вместе с тем ниобий в сталях типа 18-8 способствует образованию горячих трещин.

Медь содержится в сталях как примесь (в количестве до 0,3 % включительно), как добавка в низколегированных сталях (0,15 до 0,5 %) и как легирующий элемент (до 0,8-1 %). Она повышает коррозионные свойства стали, не ухудшая свариваемости.

При оценке влияния химического состава на свариваемость стали, кроме содержания углерода, учитывается также содержание других легирующих элементов, повышающих склонность стали к закалке. Это достигается путем пересчета содержания каждого легирующего элемента стали в эквиваленте по действию на ее закаливаемость с использованием переводных коэффициентов, определенных экспериментально. Суммарное содержание в стали углерода и пересчитанных эквивалентных ему количеств легирующих элементов называется углеродным эквивалентом. Для его расчета существует ряд формул, составленных по различным методикам, которые позволяют оценить влияние химического состава низколегированных сталей на их свариваемость:

$$С_{э\text{кв}} = C - \text{н Мп}/6 - \text{г Сг}/5 + \text{Мо}/5 + \text{V}/5 + \text{Ni}/15 + \text{Cu}/15 \text{ (метод МИС),}$$

$$С_{э\text{кв}} = C - \text{н Мп}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/40 + \text{Сг}/5 - \text{г Мо}/4 \text{ (японский метод),}$$

$$[C]_i = C - \text{г Мп}/9 + \text{Сг}/9 - \text{г Ni}/18 + 7\text{Мо}/90 \text{ (метод Сефериана),}$$

где цифры указывают содержание в стали в массовых процентах соответствующих элементов.

Каждая из этих формул приемлема лишь для определенной группы сталей, однако значение углеродного эквивалента может быть использовано при решении практических вопросов, связанных с разработкой технологии сварки. Достаточно часто расчеты химического углеродного эквивалента для углеродистых и низколегированных конструкционных сталей перлитного класса выполняются по формуле Сефериана.

По свариваемости стали условно делят на четыре группы: хорошо сваривающиеся, удовлетворительно сваривающиеся, ограниченно сваривающиеся, плохо сваривающиеся (табл. 1.1).

К первой группе относят наиболее распространенные марки низкоуглеродистых и легированных сталей ($[C]_x \leq 0,38$), сварка которых может быть выполнена по обычной технологии, т.е. без

подогрева сварки и в процессе сварки, а также без последующей термообработки. Литые детали с большим объемом наплавленного металла рекомендуется сваривать с промежуточной термообработкой. Для конструкций, работающих в условиях статических нагрузок, термообработку после сварки не производят. Для ответственных конструкций, работающих при динамических нагрузках или высоких температурах, термообработка рекомендуется.

Ко второй группе относят углеродистые и легированные стали ($[C]_x = 0,39/0,45$), при сварке которых в нормальных условиях производства трещин не образуется. В эту группу входят стали, которые для предупреждения образования трещин необходимо предварительно нагревать, а также подвергать последующей термообработке. Термообработка до сварки различная и зависит от марки стали и конструкции детали. Для отливок из стали ЗОЛ обязателен отжиг. Детали машин из проката или поковок, не имеющих жестких контуров, можно сваривать в термически обработанном состоянии (закалка и отпуск). Сварка при температуре окружающей среды ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ не рекомендуется. Сварку деталей с большим объемом наплавленного металла рекомендуется проводить с промежуточной термообработкой (отжиг или высокий отпуск), в случае, когда невозможен последующий отпуск, заваренную деталь подвергают местному нагреву. Термообработка после сварки разная для различных марки сталей. При заварке мелких дефектов стали, содержащей более $0,35\%$ углерода, для улучшения механических свойств и обрабатываемости необходима термическая обработка (отжиг или высокий отпуск по режиму для данной стали).

К третьей группе относят углеродистые и легированные стали ($[C]_x = 0,46/0,59$) перлитного класса, склонные в обычных условиях сварки к образованию трещин. Свариваемость этой группы сталей обеспечивается при использовании специальных технологических мероприятий, заключающихся в их предварительной термообработке и подогреве. Кроме того, большинство изделий из этой группы сталей подвергают термообработке после сварки. Для деталей и отливок из проката или поковок, не имеющих особо жестких контуров и жестких узлов, допускается заварка в термически обработанном состоянии (закалка и отпуск).

Без предварительного подогрева такие стали можно сваривать в случаях, когда соединения не имеют жестких контуров, толщина металла не более 14 мм , температура окружающей среды не ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и свариваемые соединения имеют вспомогательный характер. Во всех остальных случаях обязателен предварительный подогрев до температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термообработка данной группы сталей назначается по режиму, выбираемому для конкретной стали.

К четвертой группе относят углеродистые и легированные стали ($[C]x \geq 0,60$) перлитного класса, наиболее трудно поддающиеся сварке и склонные к образованию трещин. При сварке этой группы сталей с использованием рациональных технологий не всегда достигаются требуемые эксплуатационные свойства сварных соединений. Эти стали свариваются ограниченно, поэтому их сварку выполняют с обязательной предварительной термообработкой, с подогревом в процессе сварки и последующей термообработкой. Перед сваркой такая сталь должна быть отожжена. Независимо от толщины и типа соединения сталь необходимо предварительно подогреть до температуры не ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термообработку изделия после сварки проводят в зависимости от марки стали и ее назначения.

Эксплуатационная надежность и долговечность сварных конструкций из низколегированных теплоустойчивых сталей зависит от предельно допустимой температуры эксплуатации и длительной прочности сварных соединений при этой температуре. Эти показатели определяются системой легирования теплоустойчивых сталей. По системе легирования стали можно разделить на хромомолибденовые, хромомолибденованадиевые и хромомолибдеио-вольфрамовые. В этих сталях значение углеродного эквивалента изменяется в широких пределах и оценка свариваемости сталей по его значению нецелесообразна. Расчет температуры предварительного подогрева выполняется для каждой конкретной марки сталей.

Разделение высоколегированных сталей по группам (нержавеющие, кислотостойкие, жаростойкие и жаропрочные) в рамках ГОСТ 5632-72 выполнено условно в соответствии с их основными служебными характеристиками, так как стали жаропрочные и жаростойкие являются одновременно кислотостойкими в определенных агрессивных средах, а кислотостойкие стали обладают одновременно жаропрочностью и жаростойкостью при определенных температурах.

Остановимся на кратких рекомендациях по технологии сварки высоколегированных сталей, которые, как уже отмечалось, разделяются на четыре группы.

Для *хорошо сваривающихся* высоколегированных сталей термообработку до и после сварки не проводят. При значительном наклепе металл необходимо закалить от $1050-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловой режим сварки нормальный. К этой группе сталей можно отнести

ряд кислотостойких и жаропрочных сталей с аустенитной и аустенитно-ферритной структурой.

Для *удовлетворительно сваривающихся* высоколегированных сталей перед сваркой рекомендуется предварительный отпуск при 650--710 °С с охлаждением на воздухе. Тепловой режим сварки нормальный. При отрицательной температуре сварка не допускается. Предварительный подогрев до 150—200 °С, необходим при сварке элементов конструкции с толщиной стенки более 10 мм.

После сварки для снятия напряжений рекомендован отпуск при 650-710 °С с охлаждением на воздухе. К этой группе в первую очередь можно отнести большую часть хромистых и некоторых хромоникелевых сталей.

Для *ограниченно сваривающихся* высоколегированных сталей термообработка перед сваркой различная (отпуск при 650-710 °С с охлаждением на воздухе или закалка в воде от 1050-1100 °С). При сварке большинства сталей этой группы обязателен предварительный нагрев до 200-300 °С.

После сварки для снятия напряжений и понижения твердости детали сварного соединения подвергают отпуску при 650-710 °С. Для сварки ряда сталей аустенитного класса обязательна закалка в воде от 1050-1100 °С.

Для *плохо сваривающихся* высоколегированных сталей перед сваркой рекомендован отпуск по определенным режимам для различных сталей.

Для всей группы сталей обязателен предварительный подогрев до 200-300 °С. Сварка стали 110Г13Л в состоянии заковки производится без нагрева. Термообработку после сварки выполняют по специальным инструкциям в зависимости от марки стали и назначения. Для стали 110Г13Л термообработка не требуется.

Далее, таблица свариваемости (разбита на группы по ГОСТам марочника стали).

Марка стали	Заменитель	Свариваемость
ГОСТ 380-94 — Сталь углеродистая обыкновенного качества.		
Ст 0	нет	Сваривается без ограничений.
Ст2пс Ст2кп Ст2сп	Ст2сп Ст2пс	Сваривается без ограничений. Для толщины более 36 мм. рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Ст3кп	Ст3пс	Сваривается без ограничений. Для толщины более 36 мм. рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Ст3пс Ст3сп	Ст3сп Ст3пс	Сваривается без ограничений. Для толщины более 36 мм. рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Ст3Гпс	Ст3пс Ст18Гпс	Сваривается без ограничений. Для толщины более 36 мм. рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Ст4пс	Ст4сп	Сваривается ограниченно.
Ст5пс Ст5сп	Ст6сп Ст4сп	Сваривается ограниченно. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Ст6пс Ст6сп	Ст5сп	Сваривается ограниченно. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
Марка стали	Заменитель	Свариваемость
ГОСТ 5058-65 — Сталь низколегированная конструкционная.		
09Г2С	09Г2, 09Г2ДТ, 09Г2Т, 10Г2С	Свариваемость стали хорошая без ограничений.
Марка стали	Заменитель	Свариваемость
ГОСТ 1050-2013 — Сталь углеродистая качественная конструкционная.		
08	10	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
08кп 08пс	08	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
10	08; 15; 08кп	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
10кп 10пс	08кп; 15кп; 10	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
15	10 20	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
15кп 15пс	10кп 15кп.	Сваривается без ограничений.
18кп		Сваривается без ограничений.
20	15	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
20кп 20пс	15кп	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.

25	20, 30	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
30	25, 35	Сваривается ограниченно. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
35	30, 40 35Г	Сваривается ограниченно. Способы сварки: РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), ЭШС. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка. КТС без ограничений.
40	35, 45 40Г	Сваривается ограниченно. Рекомендуется подогрев и последующая термообработка.
45	40Х, 50 50Г	Трудно свариваемая. Способы сварки: РДС и КТС. Необходим подогрев и последующая термообработка.
50	45 50Г 50Г2 55	Трудно свариваемая. Необходим подогрев и последующая термообработка.
55	50, 60 50Г	Не применяется для сварных конструкций
60	55 65Г	Не применяется для сварных конструкций
<p>Марка стали Заменитель Свариваемость</p> <p>ГОСТ 1414-75 — Сталь конструкционная, повышенной обрабатываемости резанием. "автоматка"</p>		
A20	A12	Не применяется для сварных конструкций
A30, A40Г	A40Г	Не применяется для сварных конструкций
<p>Марка стали Заменитель Свариваемость</p> <p>ГОСТ 1435-90 — Сталь инструментальная нелегированная.</p>		
У7, У7А	У8	Не применяется для сварных конструкций
У8, У8А	У7, У7А, У10, У10А	Не применяется для сварных конструкций
У9, У9А	У7, У7А, У8, У8А	Не применяется для сварных конструкций
У10, У10А	У12, У12А	Не применяется для сварных конструкций
У12, У12А	У10, У10А	Не применяется для сварных конструкций
<p>Марка стали Заменитель Свариваемость</p> <p>ГОСТ 4543-71— Сталь конструкционная легированная хромистая.</p>		
15Х	20Х	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
20Х	15Х 20ХН, 18ХГТ	Сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки.
30Х	35Х	Ограниченно свариваемая.
35Х	40Х	Ограниченно свариваемая.

38ХА	40Х	Трудно свариваемая.
40Х	45Х 38ХА 40ХС	Трудно свариваемая. Способы сварки: РДС, ЭШС. Необходимы подогрев и последующая т.о. КТС - необходима последующая т.о.
45Х	40Х, 50Х	Трудно свариваемая. Необходим подогрев и последующая термообработка.
50Х	40Х,45Х 50ХН	Трудно свариваемая. Необходим подогрев и последующая термообработка.
30ХГСА	40ХФА, 35ХМ, 40ХН, 25ХГСА, 35ХГСА	Трудно свариваемая. Необходим подогрев и последующая термообработка.
Марка стали	Заменитель	Свариваемость
ГОСТ 5632-72 — Сталь высоколегированная, и сплавы коррозионностойкие жаростойкие и жаропрочные.		
40Х9С2		Не применяется для сварных конструкций
40Х1 ОС2М		Трудносвариваемая
08Х13 12Х13 20Х13 25Х1 3Н2	Стали: 12Х13 12Х18Н9Т Сталь: 20Х13 Стали: 12Х13 14Х1 7Н2	Ограниченно свариваемая
30Х13 40Х13	Сталь: 40Х13 Сталь: 30Х13	Не применяется для сварных конструкций
10Х14АП6	Стали: 12Х18Н9, 08Х1 8Н10, 12Х18Н9Т, 12Н18Н10Т	Сваривается без ограничений
12Х17	Сталь: 12Х18Н9Т	Трудносвариваемая
08Х1 7Т 08Х1 8Т1	Стали: 12Х17, 08Х1 8Т1 Стали: 12Х17, 08Х1 7Т	Ограниченно свариваемая
95Х18		Не применяется для сварных конструкций
15Х25Т	Сталь: 12Х18Н10Т	Трудносвариваемая
15Х28	Стали: 15Х25Т, 20Х23Н18	Трудносвариваемая
20Х23Н13		Трудносвариваемая
20Н23Н18	Стали: 10Х25Т 20Х23Н13	Ограниченно свариваемая
10Х23Н18		Ограниченно свариваемая

20X25H20C2		Ограниченно свариваемая
15X12ВНМФ		Трудносвариваемая
20X12ВНМФ	Стали: 15X12ВНМФ, 18X11МНФБ	Трудносвариваемая
08X17H13M21	Сталь: 10X17H13M21	Трудносвариваемая
10X17H3M2T		Трудносвариваемая
31X19H9МВБТ		Трудносвариваемая
10X14Г14Н4Т	Стали: 20X13H4Г9, 12X18H9Т, 12X18H10Т, 08X18H10Т	Сталь удовлетворительно свариваемая всеми видами сварки. Для РДС применяются электроды типа ЭА-1, ЭА-1А, ЭА-1БА. Автоматическая сварка производится под флюсом АН-26
14X17H2	Сталь: 20X1 7H2	Трудносвариваемая. Способ сварки РДС, АрДС. После сварки необходим отпуск при 680-700С в течении 30-60 мин.
12X18H9 17X18H9	Стали: 20X13H4Г9, 10X14Г14Н4Т Сталь: 20X13H4Г9	Сваривается без ограничений
08X1 8H10 08X18H10Т 12X18H9Т 12X18H10Т	Сталь: 12X18H10Т Стали: 15X25Т, 08X18Г8H2Т, 10X14Г14Н4Т	Сваривается без ограничений
Марка стали	Заменитель	Свариваемость
ГОСТ 20072-74 — Сталь теплоустойчивая.		
12X1МФ		Ограниченно свариваемая. Необходим подогрев и последующая термообработка.
<p>Основными характеристиками свариваемости сталей является их склонность к образованию трещин и механические свойства сварного шва.</p> <p>По свариваемости стали подразделяют на четыре группы:</p> <p>1 - хорошая свариваемость;</p> <p>2 - удовлетворительная свариваемость;</p> <p>3 - ограниченная свариваемость;</p> <p>4 - плохая свариваемость</p>		