

Готальский Ю.Н.

**Сварка разнородных
сталей**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
Г73

Г73 **Готальский Ю.Н.**
Сварка разнородных сталей / Готальский Ю.Н. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 180 с.

ISBN 978-5-458-28115-7

В книге систематизированы и обобщены результаты исследований по сварке разнородных сталей, рассмотрены природа и механизм образования в зоне сплавления таких сталей характерной структурной неоднородности, а также вызывающие ее факторы, приведены способы стабилизации структуры и свойств зоны сплавления. Изложен принцип выбора сварочных материалов для изготовления конструкций из разнородных сталей. Рассмотрены трудности многослойной сварки аустенитными проволоками в защитных газах, которая может быть широко использована при изготовлении комбинированных конструкций, и даны рекомендации по их преодолению.

ISBN 978-5-458-28115-7

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

к штуцерам выходных коллекторов непосредственно или через промежуточные отрезки труб из перлитной стали (рис. 2). В этом случае выходные и паросборные коллекторы, а также их патрубки изготавляются из перлитных сталей.

Заслуживают внимания котлоагрегаты, в которых из аустенитной стали изготовлены не только пароперегреватель, но и выходные и паросборные коллекторы. При использовании пара с критическими и закритическими параметрами толщина стенок коллекторов из перлитной стали должна составлять 75—90 мм. Коллектор с такой стенкой может быть только кованосверленым, что существенно усложняет технологию его изготовления. Кроме того, при таких коллекторах заметно увеличивается масса агрегата. Изготовление коллекторов из аустенитной стали способствует существенному (почти в два раза) уменьшению толщины стенок. В этом случае отпадает необходимость соединять разнородные стали в пароперегревателе и применять десятки тысяч сварных соединений, качественное выполнение которых представляет довольно сложную задачу.

Использование для коллекторов аустенитных сталей создает возможность для выполнения в котлоагрегате сварного соединения разнородных сталей только в месте присоединения паросборной камеры к котельному паропроводу. Однако такая конструкция пока не получила распространения, так как изготовленные в настоящее время из аустенитной стали толстостенные паропроводные трубы в условиях длительной работы при высоких температурах оказались склонными к локальному разрушению по околосшовной зоне, природа и причины образования которого, несмотря на большое количество проведенных исследований, еще не установлены.

Из других соединений разнородных сталей в паросиловых установках можно отметить соединение гильзы паровпуска из жаро-прочной высокохромистой стали с паропроводом и внешним цилиндром из перлитной теплоустойчивой стали. В ряде случаев в паропроводы из перлитных сталей ввариваются узлы или отдельные детали из высоколегированных хромистых сталей. Это прежде всего некоторые узлы арматуры, например регулирующие клапаны паровых турбин. Сюда можно отнести также измерительные диафрагмы, предназначенные для замера расхода пара.

Большинство современных энергетических установок с ядерным реактором работают по двухконтурной схеме. В первичном контуре теплоносителем служит вода, нагретая до сравнительно высоких температур, в результате чего она должна находиться здесь под высоким (порядка 10—15 МПа) давлением. В наиболее распространенных реакторах (реакторы ВВР) это давление воспринимается металлическим корпусом, поэтому он должен быть толстостенным. По этой причине корпус реактора современных энергетических установок изготавливается из низко- или среднелегированной стали с облицовкой внутренней поверхности нержавеющим металлом. Трубопроводы в первичном контуре изготавливаются из аустенитной стали. Поэтому получила распространение конструкция первичного

контура, при которой разнородные стали соединяются у корпуса реактора. Вторичный контур в действующих атомных электростанциях полностью состоит из обычных конструкционных и строительных сталей. В перспективе при использовании других теплоносителей или дополнительного перегрева пара не исключена возможность комбинированного изготовления и этого контура.

В оборудовании так называемой малой энергетики довольно широко можно использовать конструкции, комбинированные из разнородных сталей. Сюда относятся небольшой мощности газовые турбины в различного рода турбоагрегатах вспомогательного назначения, например в турбоком-

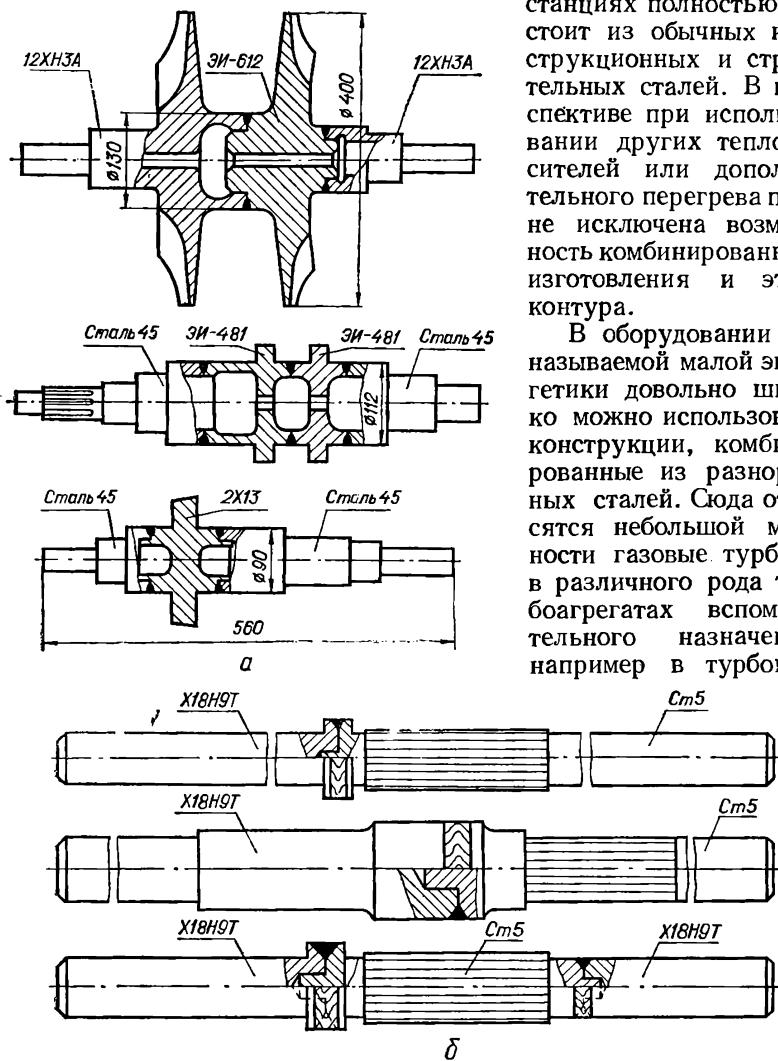


Рис. 3. Варианты комбинированного изготовления из разнородных сталей:

а — роторов турбокомпрессоров для наддува двигателей внутреннего сгорания;
б — валов специальных электродвигателей.

прессорах для наддува двигателей внутреннего сгорания. Сюда же можно отнести и различного вида электродвигатели специального назначения. Комбинированной в таком оборудовании изготавливается

в основном его вращающаяся часть — ротор. Это объясняется тем, что некоторая часть ротора работает в условиях, в которых необходимо применение аустенитной стали. Но такая сталь склонна к задиранию на трущихся поверхностях — в шейках, находящихся в подшипниках. В связи с этим здесь стремятся применять перлитную сталь, что позволяет получить трущуюся поверхность с более высокой твердостью.

В изготовлении комбинированных роторов газовых турбоагрегатов вспомогательного назначения наибольшее распространение получило конструктивное решение, при котором к аустенитному диску привариваются полу валы из перлитной стали (рис. 3, а). В электродвигателях специального назначения комбинированным

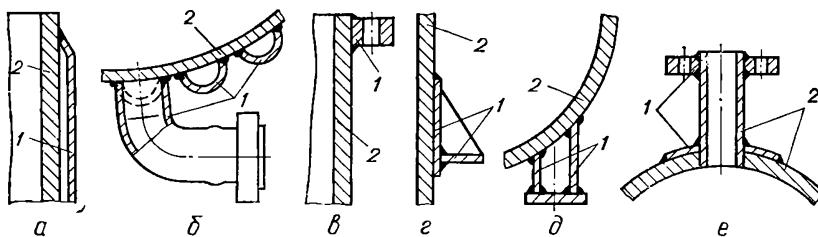


Рис. 4. Схема присоединения наружных элементов (1 — перлитная сталь) к корпусу реакционных аппаратов (2 — нержавеющая сталь):
а — рубашки; б — охладительных труб; в — фланца; г — упора; д — опоры (лапы); е — упорного кольца.

является вал ротора (рис. 3, б). Здесь также необходимо сваривать аустенитную сталь с перлитной.

Комбинирование из разнородных сталей может быть широко использовано в химической промышленности при изготовлении теплообменных аппаратов, особенно таких, как кожухотрубные теплообменники. У многих из них теплоноситель внутри труб является агрессивной средой или имеет высокую температуру, поэтому трубы изготавливаются из высоколегированной стали. Продукт межтрубного пространства в этих аппаратах часто бывает таким, что трубные доски (решетки) и корпус можно изготавливать из обычной углеродистой или низколегированной стали.

Комбинирование из разнородных сталей можно применить также в реакционных колоннах, полимеризаторах, воздушных сатураторах, вакуумперегонных аппаратах и др. Здесь в целях экономии к корпусу, изготавляемому во многих случаях из нержавеющей стали, привариваются различного рода наружные элементы (фланцы, рубашки, холодильные трубы, опоры, упорные скобы, упорные кольца и др.), которые в соответствии с условиями работы могут быть из обычной углеродистой стали (рис. 4).

Комбинированными из разнородных сталей могут быть изготовлены также холодильные установки глубокого охлаждения,

предназначенные для сжижения газов (кислорода, азота, водорода и гелия).

Широко применяются конструкции, комбинированные из разнородных сталей, в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Непрерывный рост потребности в нефтепродуктах, значительное расширение их ассортимента и дальнейшее повышение требований к качеству этих продуктов вызвали необходимость совершенствования существующих и создания новых, более эффективных процессов переработки нефти, в результате чего во многих случаях нефтеперерабатывающее оборудование приходится использовать в условиях низких (минус 50—100° С) и высоких (850—900° С) температур. Кроме того, почти все нефти, поступающие на переработку, содержат вещества и соединения, вызывающие коррозию металлических изделий, которая снижает качество не только оборудования, но и получаемого продукта, поэтому для изготовления нефтеперерабатывающего оборудования широко используются нержавеющие стали.

Процесс переработки нефти в настоящее время построен таким образом, что на всем пути движения перерабатываемого продукта в установке (от места его поступления до места выхода) физическое состояние и химический состав его изменяются, в результате чего различные агрегаты, установки и даже их отдельные узлы работают в разных температурных условиях. Многие из них работают при температуре, допускающей использование теплоустойчивых или даже обычных конструкционных сталей.

В нефтеперерабатывающем оборудовании комбинированными из разнородных сталей целесообразно изготавливать, например, аппараты (реакторы), предназначенные для осуществления тепловых и химических процессов переработки нефти. К ним относятся прежде всего реакторы термического каталитического риформинга и регенераторы установки каталитического крекинга, где к корпусу из углеродистой или низколегированной стали привариваются внутренние детали и устройства (защитные кожухи, кольца от парной зоны и др.), изготавляемые из высококромистых сталей. В современном оборудовании для переработки нефти комбинированными являются также ректификационные тарелки, отдельные элементы которых изготавливаются из высококромистых сталей.

Комбинированные конструкции применяются также в установках для дегидрирования бутана, бутилена и других исходных материалов при получении непредельных углеводородов. Такие конструкции применяются и в змеевике-реакторе трубчатых печей, которые широко распространены в нефтеперерабатывающей промышленности, являясь основным агрегатом в установке для пиролиза нефтяных фракций и основной частью многих аппаратов, применяемых при других процессах переработки нефти и ее продуктов. В отечественной практике змеевики в радиантной части печи изготавливаются из аустенитной стали. Для змеевиков конвективной части могут применяться трубы из среднелегированной стали

15Х5М, а в некоторых местах даже из обычной углеродистой стали.

К конструкциям, комбинируемым из разнородных сталей, можно отнести также изделия, изготовленные из биметалла, представляющего собой двухслойную сталь, у которой основной (несущий) слой является обычной углеродистой или низколегированной сталью, а плакирующий — нержавеющей: высокохромистой ферритной (полуферритной) или хромоникелевой аустенитной.

Применение биметалла позволяет значительно (до 70% от веса изделия) снизить расход высоколегированной стали. В связи с этим биметаллические конструкции находят все большее применение в условиях, вызывающих коррозию металла. Большое распространение такие конструкции получили в пищевой, химической, а также в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Они применяются также при изготовлении различного рода емкостей для перевозки и хранения агрессивных жидкостей. Целесообразно применять биметалл для корпусов ядерных реакторов, которые в настоящее время изготавливаются из низко- или среднелегированной стали с облицовкой внутренней поверхности нержавеющим металлом.

Конструкции из биметалла в основном изготавливаются с применением сварки. В соответствии с принятой в настоящее время технологией сварки биметалла основной (несущий) слой его заваривается с применением сварочных материалов, образующих шов из углеродистого или низколегированного металла, плакирующий (защитный) слой сваривается с получением в шве высоколегированного металла, удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к этому слою. При этом получается сварное соединение, макроструктура которого приведена на рис. 5. Как показано на рисунке, при сварке биметалла имеет место сплавление сталей разных классов (линия АБВ), что и является основанием отнести изделия, изготавливаемые из биметалла, к конструкциям, комбинируемым из разнородных сталей.

В ряде случаев конструкции, эксплуатируемые в агрессивных средах, изготавливаются из обычной углеродистой или низколегированной стали с нанесением путем наплавки защитного слоя из высоколегированного металла. В таких конструкциях также может проявиться особенность, присущая сварным соединениям из разнородных сталей. Следовательно, изделия с наплавленным слоем



Рис. 5. Макроструктура сварного соединения двухслойной стали (АБВ — линия сплавления высоколегированного металла шва с углеродистой сталью).

защитного металла можно отнести к конструкциям, комбинируемым из разнородных сталей. Такие изделия широко применяются в атомной энергетике (наплавка внутренней поверхности корпуса реактора), а также в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, где защитный слой наплавляется на те поверхности массивных литых или кованых деталей и фланцев из проката, которые соприкасаются с агрессивной средой.

Особую группу конструкций, которые можно отнести к комбинированным из разнородных сталей, составляют изделия из закаливающихся сталей, сваренные аустенитными электродами. При сварке таких сталей в зоне термического влияния образуются малопластичные структуры, способствующие возникновению околошовных трещин. Чтобы предотвратить образование этих трещин, сварку закаливающихся сталей необходимо производить с предварительным, а иногда и сопутствующим подогревом, а изделия из закаливающихся сталей после сварки подвергать отпуску. Однако такая технология значительно усложняет выполнение сварочных работ, а кроме того, подогрев свариваемого изделия и его термообработку в ряде случаев осуществить трудно или вовсе невозможно. Отмеченные недостатки явились причиной новых поисков, в результате которых было установлено, что применение сварочных материалов, обеспечивающих аустенитную структуру металла шва, дает возможность сваривать закаливающиеся стали без трещин, не прибегая к подогреву и последующей термообработке.

В настоящее время сварные соединения с аустенитной структурой металла шва стали применяться во всех конструкциях из закаливающихся сталей, которые нельзя подвергнуть предварительному подогреву и последующей термообработке.

Аустенитными электродами свариваются технологические трубопроводы нефтеперерабатывающих установок, изготавляемые из закаливающейся хромомолибденовой стали X5M. Применение аустенитных электродов вызвано тем, что термообработка этой стали, необходимая при сварке ее неаустенитными электродами, должна выполняться при довольно жестких условиях. Как известно, отпуск стали X5M в области температур ниже критической (ниже 700° С) требует для распада образовавшегося в ней мартенсита длительной (до 4—6 ч) выдержки. При нагреве этой стали выше критической температуры охлаждение должно быть медленным, чтобы не превысить критическую (вызывающую закалку) скорость, которая у стали X5M очень мала. Большинство же соединений трубопроводов нефтеперерабатывающих установок выполняется при их монтаже. В таких условиях термообработка по режиму, требуемому для отпуска закаленной стали X5M, встречает значительные трудности.

В последнее время появляется все большая потребность в различного рода сосудах, которые должны работать при высоких температурах и давлениях (реакторы химических и нефтехимических установок, барабаны паровых котлов современных котлоагрегатов

и др.). В связи с этим их следует изготавливать из легированных сталей большой толщины, сварку которых необходимо производить с предварительным подогревом и последующей термической обработкой. Между тем конструкция и размеры этих сосудов таковы, что при изготовлении их недостатки, присущие такой сварке, становятся особо ощутимыми. По этой причине все чаще поднимается вопрос о применении сварочных материалов, обеспечивающих получение аустенитного металла шва, с тем чтобы исключить предварительный подогрев и последующую термообработку. Применение аустенитных электродов необходимо прежде всего для приварки к корпусу внутренних и наружных деталей, в том числе и штуцеров.

Таким образом, конструкции, комбинируемые из разнородных сталей, могут быть применены почти во всех отраслях современной промышленности. Возможное сочетание сталей в комбинированных конструкциях определяется теми требованиями, которые вытекают из условий эксплуатации изделия. Такими условиями являются агрессивная среда и высокая температура отдельно или то и другое вместе. Поэтому в комбинированных конструкциях возможно сочетание высоколегированной нержавеющей или жаропрочной стали со средне- или низколегированной и даже обычной углеродистой. Возможно сочетание обычных конструкционных сталей (средне- и низколегированных) со сталью, обладающей требуемой работоспособностью при весьма низких температурах. Последними, как известно, являются высоколегированные стали.

При обычном способе производства (охлаждение после горячей обработки на воздухе) указанные стали настолько сильно отличаются друг от друга своей структурой, что их по существующим стандартам относят к различным классам: углеродистые, а также низко- и среднелегированные — к перлитному, а высоколегированные — к одному из таких классов, как аустенитный, ферритный, мартенситный, аустенито-ферритный, аустенито-мартенситный и мартенсито-ферритный (ГОСТ 5632—72). То обстоятельство, что используемые в комбинированных конструкциях стали относятся к разному классу, и послужило основанием применить термин разнородные стали, который широко используется сейчас в сварочной науке и технике.

В табл. 1 приведены основные марки сталей, из которых изготавливаются комбинированные конструкции. Как видно из таблицы, для изготовления комбинированных конструкций может быть использован широкий ассортимент сталей, отличающихся одна от другой физико-химическими свойствами. В связи с этим число возможных сочетаний разнородных сталей может быть весьма большим.

1. Основные области применения комбинированных конструкций и используемые марки сталей

Область применения	Стали, используемые для изготовления части изделия, работающей в условиях	
	специфических	обычных
Энергетическое оборудование	<p><i>Аустенитные:</i> X18H10T; X18H12T; X14H14B2M (ЭИ257); X16H26M6A (ЭИ395); X16H13M2B (ЭИ405); X18H9BMTB (ЭИ572); X15H35B3T (ЭИ612); X17H14B2B (ЭП17); X16H14B2MT (ЭП184)</p> <p><i>Ферритные:</i> OX13 (ЭИ496); X17; X25T (ЭИ439)</p> <p><i>Мартенситные и др.:</i> 1X13; 2X13; 15X1MФ; 15X12B2MФ (ЭИ756); 2X12BМФБР (ЭИ993)</p>	<p><i>Углеродистые:</i> Ст3; сталь 10; сталь 20; 22К; 25Л; сталь 45</p> <p><i>Низколегированные:</i> 15ГС; 14ХГС; 12ХМ; 20ХМ; 30ХМА; 34ХМ; 20ХМЛ</p> <p><i>Среднелегированные:</i> 35ХН3МФ; 12Х1МФ; 15Х1М1Ф; 15Х2МФСР; 20Х3МВФ (ЭИ415); 20ХМФЛ; 15Х1М1ФЛ; 18ХНВА</p>
Оборудование химической промышленности	<p><i>Аустенитные:</i> X18H9; X18H10T; X18H12T; X23H18; X17H13M3T (ЭИ432); OX23H28M2Д3T; (ЭИ943)</p> <p><i>Ферритные:</i> X17; OX17T; X25T; X28H (ЭИ657)</p> <p><i>Мартенситные и др.:</i> 1X13; 2X13; OX21H5 (ЭП53); OX21H6M2T (ЭП54)</p>	<p><i>Углеродистые:</i> Ст3; сталь 20</p> <p><i>Низколегированные:</i> O9Г2С; 10ГС</p> <p><i>Среднелегированные:</i> 22Х3М; 20Х3МВФ; 25Х3НМ; 18Х3М1В1Ф (ЭИ578)</p>
Оборудование для переработки нефти	<p><i>Аустенитные:</i> X18H10T; X18H12T; X14Г14Н3Т (ЭИ711); X23H18; X25H20</p> <p><i>Ферритные:</i> OX13 (ЭИ496); X17; X25T (ЭИ439)</p> <p><i>Мартенситные:</i> 1X13; 2X13</p>	<p><i>Углеродистые:</i> Ст3; Ст3Н; Сталь 20</p> <p><i>Низколегированные:</i> 10Г2; 12ХМ; 15ХМ; 30ХМ</p> <p><i>Среднелегированные:</i> 12Х1МФ; X5; X5M (Х5М-У); X5ВФ; 18Х3М1В1Ф (ЭИ578); 20Х3МВФ1 (ЭИ579)</p>
Биметаллические конструкции	<p>Ст3 + X18H10T; Ст3 + OX13 (ЭИ496); 20K + O17H13И3T; 1X2M1 + 1X18H10T; O9Г2С + + 1X18H10T; 12Х1М + + 1X18H10T; 20X2M + + OX18H10T</p>	<p><i>Углеродистые:</i> Ст3; сталь 20; 15К; 20К</p> <p><i>Низколегированные:</i> 10Г2; 12ХМ; 15ХМ; 30ХМ</p> <p><i>Среднелегированные:</i> 12Х1МФ; X5M (Х5М-У); X5ВФ; 18Х3М1В1Ф (ЭИ578); 20Х3МВФ1 (ЭИ579)</p>
Конструкции из закаливающихся сталей	<p>X5M; 12ХМФ; 15Х1М1Ф; 20ХМА; 12Х2МФСР; 20ХСФЛ; 20Х3МВФ (ЭИ415); 15Х1М1ФЛ; броневые стали</p>	<p>Сталь 35; сталь 45; 25Л; 34ХМ; 25ХГС; 30ХГС; 30ХГСНА; 35ХН3М; 25Х3НМ</p>

2. Особенности сварки разнородных сталей

Сварка разнородных сталей имеет свои специфические особенности, обусловленные необходимостью получения сварных соединений, способных работать в особых условиях.

При сварке разнородных сталей в сварном соединении могут образовываться околошовные трещины — отколы, располагающиеся обычно вдоль границы сплавления на некотором расстоянии от нее. Возникают эти трещины, как правило, в том случае, если в комбинированной конструкции используются стали, склонные к закалке: высоколегированные мартенситные или низко- и среднелегированные перлитные.

Трудность сварки разнородных сталей в металле шва состоит и в том, что могут появиться горячие трещины, под которыми принято понимать трещины, образующиеся при температурах, находящихся в области солидуса металла шва. В конструкциях, комбинируемых из разнородных сталей, свариваются высоколегированные стали с низко- или среднелегированными и углеродистыми. В большинстве случаев, особенно когда в качестве специальной стали используется аустенитная, сварка производится с применением материалов, обеспечивающих высоколегированный металл шва, который весьма склонен к образованию горячих трещин.

Отмеченные трудности встречаются не только при изготовлении конструкций, комбинируемых из разнородных сталей. Способы их предотвращения уже достаточно известны и определяются теми причинами, которые вызывают образование трещин в сварном соединении.

Околошовные трещины-отколы неоднократно рассматривались в литературе. Однако механизм образования этих трещин и причины их возникновения еще не достаточно ясны и для их объяснения выдвинуты две гипотезы.

Согласно первой гипотезе, названной закалочной, отколы возникают в результате закалочных явлений, происходящих в околошовной зоне легированных сталей. При сварке сталей, склонных к закалке, в околошовной зоне вследствие образования мартенсита, обладающего из всех структурных составляющих наибольшим удельным объемом, возникают структурные напряжения, которые вызывают микротрещины. Под действием сварочных напряжений микротрещины развиваются и переходят в макротрещины, наблюдаемые при изготовлении сварного соединения или в процессе его эксплуатации.

Вторая, так называемая водородная, гипотеза основана на том, что главной причиной образования трещин в околошовной зоне закаливающихся сталей является насыщение этой зоны водородом путем диффузии его из металла шва. Для доказательства используется тот общеизвестный факт, что замена феррито-перлитных электродов аустенитными исключает появление отколов. Согласно

водородной гипотезе, отсутствие отколов при сварке аустенитными электродами обусловлено тем, что в аустенитном металле растворимость водорода значительно больше, чем в феррито-перлитном. Резкое падение растворимости водорода в феррито-перлитном металле шва при фазовом превращении последнего приводит к диффузии этого элемента в окколошовную зону, где в это время, вследствие большей легированности свариваемого металла по сравнению с металлом шва, сохраняется еще аустенитная структура. В результате при одинаковом количестве усвоенного сварочной ванной водорода в случае сварки феррито-перлитными электродами окколошовная зона насыщается им значительно больше. Выделяясь при последующем распаде аустенита окколошовной зоны, атомарный водород скапливается в местах физической несплошности этой зоны (пустые места решетки, стыки мозаичных блоков, границы зерен и др.) и переходит в молекулярное состояние. При этом развиваются большие давления, вызывающие образование надрывов, которые затем развиваются в трещины, обнаруживаемые в окколошовной зоне.

Появилось и другое представление о механизме влияния водорода на образование холодных трещин в окколошовной зоне, согласно которому насыщение водородом металла шва окколошовной зоны снижает его сопротивляемость замедленному (задержанному) разрушению, что и увеличивает вероятность образования надрывов.

Однако указанные гипотезы вызывают следующие возражения. Водородной гипотезе противоречит ряд факторов, наблюдаемых в практике сварки закаливающихся сталей. С ее помощью нельзя удовлетворительно объяснить, например, тот общеизвестный факт, что с увеличением содержания углерода склонность стали к образованию трещин резко увеличивается. Эта гипотеза не объясняет также, почему при прочих равных условиях трещины часто возникают в случае сварки стыковых швов и отсутствуют при выполнении наплавочных слоев (наплавка отдельных валиков или широко применяемая в практике сварки закаливаемых сталей предварительная облицовка свариваемых кромок). Противоречит водородной гипотезе и тот общеизвестный факт, что склонность стали к образованию трещин в окколошовной зоне повышается с увеличением ее толщины.

Вместе с тем некоторые эксперименты показывают, что можно вызвать трещины в окколошовной зоне, насыщая шов водородом [39]. Однако считать эти эксперименты подтверждением опасного насыщения окколошовной зоны водородом нет оснований. Выделенный из металла шва водород прежде всего будет скапливаться в несплошностях самого металла шва, возникновению которых способствует ускоренная его кристаллизация в условиях сложно напряженного состояния. При этом атомарный водород переходит в молекулярный, который не способен к диффузии.

Сказанное не означает, что водород не влияет на образование трещин в окколошовной зоне закаливающихся сталей. По мнению