

Ш 316

✓ Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Инженер В. М. ШАХМАТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ
КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ
ЧУГУНА И ЧУГУНА СО СТАЛЬЮ

05.03.06

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЧПИ

ЧЕЛЯБИНСК

1963

ВВЕДЕНИЕ

В решениях Пленума ЦК КПСС 1960 г. совнархозам, министерствам и ведомствам предлагается форсировать работу по замене неэкономичных клепаных, литых и кованых конструкций сварными, что обеспечивает более экономичное расходование металла, упрощает и удешевляет весь технологический цикл производства.

В настоящее время сварка по объему ее применения используется главным образом для изготовления стальных конструкций. Применительно к чугунным изделиям как в литейном производстве, так и в машиностроении вопрос об использовании сварки как основного процесса до последнего времени практически не ставился. Это обусловлено тем, что чугун обладает плохой свариваемостью и сварочная техника не располагала достаточно надежными технологическими средствами для получения равнопрочного сварного соединения.

На кафедре сварки ЧПИ [1, 2] экспериментально установлена и теоретически обоснована возможность получения качественного соединения чугуна с чугуном или со сталью методом контактной стыковой сварки.

Одной из перспективных областей, где стыковая сварка может быть применена в большом объеме и с повышенными экономическими показателями, является производство чугунных литых труб. Форма и размеры литых труб, массовый характер их производства вполне приемлемы для изготовления с помощью контактной стыковой сварки.

Главной проблемой дальнейшего совершенствования труболитейного производства является переход на высокопроизводительные способы непрерывной и полунепрерывной отливки. Однако решение этой проблемы задерживается наличием трудностей при отливке раструбных частей.

Расчеты показывают, что здесь оказывается экономически целесообразным сварно-литой вариант по схеме: непрерывная отливка цилиндрического ствола трубы — центробежная или кокильная отливка раструба — последующая стыковая сварка

этих частей. Схема в принципе аналогична широко распространенной схеме изготовления стальных конструкций в комбинации прокат-штамповка, так как в обоих случаях оказывается возможным применить наиболее высокопроизводительные способы изготовления отдельных элементов.

С помощью стыковой сварки можно коренным образом улучшить и давно известные, распространенные методы литья. Известно, например, что центробежная отливка технологически затрудняется с увеличением длины трубы. Преодоление этих осложнений сопряжено с технологическими трудностями отливки и резким увеличением расходов на оборудование, оснастку и материалы. Процесс центробежной отливки во всех его звеньях значительно упрощается и удешевляется, если трубы отливать меньшей длины с последующей их сваркой на стыковых машинах.

На базе применения стыковой сварки становится возможным пересмотр оптимальной длины труб. В сварно-литом варианте возможно производство труб в самых различных, наиболее экономных сочетаниях их длины и толщины стенок.

Опыт Первоуральского старотрубного завода показывает, что в массовом производстве стыковая сварка может быть успешно использована и как средство восстановления бракованных труб путем вырезки бездефектных участков с последующей сваркой в плети нормальной длины. Кроме труболитейного производства, стыковая сварка может быть применена в литейных цехах машиностроительного производства.

Как показал экономический анализ и начальный опыт внедрения на предприятиях Челябинского треста «Южуралсантехмонтаж», стыковая сварка с хорошими показателями может быть применена и в строительном производстве при изготовлении чугунных элементов санитарно-технических систем.

В связи с переходом на строительство по типовым проектам возможно в массовом количестве предварительно сочленять части систем в более крупные типовые блоки на стационарных базах и устанавливать их в таком виде на строительном объекте. Соединения частей в блоки обычно выполняются как неразъемные, поэтому экономически выгодно раструбные сопряжения заменять сварными соединениями. Экономия достигается, во-первых, за счет уменьшения веса элементов, ввиду отсутствия раструбов, и, во-вторых, за счет уменьшения стоимости монтажных работ. Предварительные расчеты показали, что общая стоимость материалов и труда на сварку в 1,5—2,5 раза меньше, чем на соединение с помощью раструбов.

Сварка чугуна со сталью может быть широко применена в машиностроении как способ комбинированных соединений

чугуна со сталью, в которых будут использованы все положительные технологические и эксплуатационные свойства этих разнородных металлов (высокие литейные качества, малая стоимость, хорошая химическая стойкость чугуна и прочность, свариваемость, штампуемость стали).

Учитывая важность применения контактной стыковой сварки в создании сварно-литых чугунных изделий и особенно при отливке чугунных труб, Совет Министров обязал отраслевые институты разработать технологию и оборудование для контактной стыковой сварки чугунных труб. В свете этой общей задачи и поставлена диссертационная работа.

Вопрос о стыковой сварке чугуна рассматривается с двух сторон: общетеоретической и прикладной, практической.

Особые механические и физические свойства чугуна потребовали детального исследования совершенно новых вопросов, как технологическая прочность при стыковой сварке, влияние графитных составляющих на процесс сваривания, особенности в структурных превращениях в зоне термического влияния и в течении диффузионных процессов при сварке чугуна со сталью и др.

На этой общей базе оказалось возможным изыскать наиболее оптимальные методы сварки и параметры режима. Опыт внедрения стыковой сварки чугуна и чугуна со сталью позволил дать общие рекомендации, полезные в непосредственной практике подобного производства.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовался чугун СЧ21-40, СЧ13-22 и сталь марок Ст.20, Ст.45 и Ст.45Х. Сварка выполнялась сопротивлением, непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом на серийных машинах завода «Электрик».

Для проверки основных параметров режима машины были оснащены приборами для регистрации перемещения подвижной плиты во времени и для замера давления.

Сварочный ток, вторичное напряжение и температура в зоне сварки записывались с помощью шлейфового осциллографа. В качестве датчика для замера температуры использовались хромель-алюмелевые термодпары.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ПРИ ОСАДКЕ И ВЫБОР ДАВЛЕНИЯ

Необходимым условием качественной сварки давлением является пластическое деформирование в зоне стыка. Естественно, что напряжения, возникающие при осадке, не должны

превышать разрушающих. Для большинства сталей и сплавов эти деформации не опасны и вопрос о сохранении целостности металла не ставится. Чугун при нагреве обладает, как известно, невысокими прочностными показателями, особенно низка пластичность. Согласно проведенным исследованиям, прочность на сжатие, начиная с температуры 400°C , резко падает, и при 1000°C чугун практически полностью теряет способность нести механическую нагрузку. Относительное удлинение, достигнув максимума при 800°C , резко снижается и при 1000°C равно нулю.

Если опираться только на эти исследования, то можно было бы считать, что разрушение чугуна неизбежно при сварке на любых режимах, даже при относительно небольшом давлении. Однако опыт показывает, что существует некоторый диапазон режимов нагрева и давления, в пределах которого технологическая прочность достаточна для получения качественного соединения.

Экспериментально найдено, что разрушение тем более вероятно, чем глубже нагрев, т. е. чем ниже градиент температуры. При достаточно высоком градиенте разрушение не происходит при давлении, значительно превосходящем разрушающее напряжение сжатия для равномерно нагретых стержней. Очевидно, что прочностные свойства стержней в условиях резко неравномерного нагрева существенно отличны от свойств равномерно нагретого металла. В момент осадки температура в плоскости стыка распределена равномерно, и ее без ошибки можно считать примерно равной температуре плавления. Поэтому температурный режим достаточно полно может быть охарактеризован одним параметром — величиной и распределением градиента температуры по оси. Этим же параметром будет определяться и технологическая прочность.

Для подтверждения и уточнения зависимости технологической прочности от градиента была проведена серия экспериментов.

Опыты велись путем «сварки» стержней из серого чугуна методом сопротивления и методом оплавления с подогревом и без подогрева. Нагрев фиксировался термопарами в точках, отстоящих от стыка на 6, 10 и 15 мм; в качестве признака начального разрушения принималось появление первых трещин в зоне стыка. В качестве определяющего принимался усредненный градиент в диапазоне температур плавления 800°C (зона наибольшей пластической деформации). Результаты опытов были обработаны и выражены кривой зависимости технологической прочности от среднего градиента температур вдоль оси.

Установлено, что технологическая прочность при сварке со-

противлением ввиду малого градиента температур столь низка, что даже явное недостаточное давление в 1 кг/мм^2 влечет к разрушению; при сварке оплавлением с подогревом она колеблется в пределах $3-4 \text{ кг/мм}^2$ и при сварке без подогрева достигает 6 кг/мм^2 .

Зависимость технологической прочности от градиента температуры достаточно точно аппроксимируется экспонентой вида:

$$\sigma_d = \sigma_{d0} \left(1 - e^{-m \frac{dT}{dx}} \right)$$

где σ_d — показатель технологической прочности, т. е. предельное удельное давление, кг/мм^2 , при котором начинается разрушение;

σ_{d0} — временное сопротивление к сжатию чугуна при комнатной температуре, кг/мм^2 ;

$\frac{dT}{dx}$ — градиент температуры в зоне интенсивного нагрева и деформации, т. е. в интервале температур плавления до 800°C , град/мм ;

m — коэффициент, зависящий от свойства металла; для чугуна СЧ21-40 он может быть принят равным 0,01.

Найденные зависимости технологической прочности чугуна от градиента температуры могут быть использованы для практических целей при выборе параметров режима сварки чугуна и чугуна со сталью.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАФИТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС СВАРИВАНИЯ

С целью исследования влияния графитной составляющей на процесс сваривания были проведены эксперименты по сварке сопротивлением, трением и оплавлением. Многочисленные опыты сварки сопротивлением и трением в различных вариантах режимов и защитной среды привели к отрицательному результату. Определяющими факторами были практически непреодолимая сложность осуществления сварки чугуна в твердой фазе и его низкая технологическая прочность. При сварке сопротивлением во всех случаях в стыке наблюдаются цепочки графитных включений. Форма структурной связи различна. Наряду с отдельными местами образования общих зерен наблюдаются их сопряжения через окисные пленки. Графитные включения по ходу пластического течения металла располагаются в плоскости стыка и резко ослабляют сварное соединение. В

экспериментах по сварке трением серого чугуна это явление выражено еще в более четкой форме: поверхность стыка оказывается полностью покрытой графитной составляющей. Последняя практически исключает возможность образования металлической связи и, кроме того, действуя как своеобразная смазка, сильно уменьшает интенсивность тепловыделения.

Повышение степени нагрева и давления как средства борьбы с неметаллическими включениями при стыковой сварке сопротивлением и трением ограничивается малой технологической прочностью, обусловленной низким градиентом температуры при этих способах. Уже при давлении в 1,5—2,5 кг/мм² металл начинает разрушаться.

Серия опытов сварки сопротивлением чугуна со сталью показала, что в этом случае условия для образования сварного соединения более благоприятны, а прочностные показатели существенно выше, чем при сварке чугуна с чугуном. Этому способствует, как было установлено металлографическим исследованием, интенсивная диффузия углерода из чугуна в сталь. Следует, кроме того, учесть, что отсутствие графитной составляющей со стороны стали резко повышает вероятность встречи и сварки металлических поверхностей.

Технологические трудности сварки чугуна со сталью сопротивлением все же сохраняются, так как защита от окисления остается неполной, удаление окисных и графитных включений практически невыполнимо, а давление осадки ограничивается низкой прочностью сильно нагретого чугуна.

При сварке оплавлением как чугуна с чугуном, так и чугуна со сталью графитные включения в объеме зоны соединения стыка распределены равномерно, как и в основном металле, без скоплений в плоскости стыка; характерным является отсутствие ледобуритной структуры. Лишь в отдельных случаях при некоторых режимах наблюдаются разобщенные островки ледобурита. Прочность соединения близка к прочности основного металла.

Проведенные исследования позволяют полагать, что при сварке чугуна расплавление торцов и образование жидкой пленки играют особо важную роль. По-видимому, положительная роль расплавления заключается в том, что при этом происходит растворение неметаллического графита и соединение в завершающей стадии осуществляется между частицами в аустенитном состоянии с металлическим строением. Жидкая фаза с поверхности торцов полностью удалена не может быть, и даже при незначительном оставшемся количестве она способна играть свою положительную роль. В то же время малое количество жидкой фазы и сравнительно невысокая скорость

охлаждения делают маловероятным образование сплошной зоны с ледебуритной структурой. Надо полагать, что этому во многом способствуют процессы интенсивной пластической деформации в плоскости стыка и прилегающих слоях.

Таким образом, экспериментально установлено, что наличие жидкой фазы в процессе стыковой сварки серого чугуна предопределяет весь ход процесса сварки, является весьма важным технологическим фактором, обеспечивающим качество сварного соединения.

Качественное сварное соединение при контактной стыковой сварке чугуна в отличие от дуговой и газовой сварки обеспечивается следующими принципиально важными условиями:

1) в завершающей стадии процесса, в конце осадки, жидкая фаза из плоскости стыка почти полностью вытесняется. Поэтому все осложнения, связанные при газовой и дуговой сварке чугуна с пребыванием металла в расплавленном состоянии (отбел, образование трещин), здесь исключаются;

2) при стыковой сварке нагрев идет сразу по всей площади стыка, температурное поле может быть охарактеризовано как линейное. Одновременность нагрева в плоскости стыка исключает возникновение тех напряжений, которые при дуговой и газовой сварке обуславливаются переменной и возрастающей реакцией связи со стороны уже сваренных участков соединения. Линейное температурное поле для трещинообразования имеет опасность значительно меньшую, чем объемное, свойственное дуговой и газовой сварке. Однородность температурного поля в плоскости стыка, одновременность возникновения сварного соединения резко снижают уровень остаточных напряжений и опасность образования термических трещин;

3) процесс сваривания происходит под воздействием давления. Оно способствует уплотнению металла, свариванию различных макро- и микродефектов (пор, начальных трещин), что дополнительно гарантирует зону стыка от возникновения трещин;

4) технологические возможности регулирования термического цикла у процесса стыковой сварки значительно шире, чем у дуговой (за счет установочной длины, скорости и оплавления, напряжения холостого хода, предварительного подогрева в губках машины), что в целом без особых осложнений в процессе сварки позволяет обеспечить получение умеренных скоростей охлаждения и избежать, таким образом, закаливания в стыке и зоне термического влияния;

5) ввиду отсутствия в соединении инородного присадочного металла при стыковой сварке значительно легче обеспечить со-

хранение всех химических и физических свойств основного тела изделия;

б) благодаря особенностям процесса стыковой сварки химический состав и структурное строение чугуна при этом способе влияют на свариваемость значительно слабее, чем при газовой и дуговой сварке.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУР

В связи с большим содержанием углерода в чугуне при контактной стыковой сварке в зависимости от термических режимов возможно образование различных структур, в том числе и неравновесных. Поэтому эта сторона процесса, во многом определяющая качество сварного соединения, была отдельно изучена.

Методически вся работа проводилась по единой схеме. К свариваемому чугунному стержню диаметром 20 мм в определенных местах предварительно приваривались термопары, которые присоединялись к вибраторам осциллографа МПО-2. Показания осциллографа тарировались по заранее градуированному гальванометру.

Замер температур от места сварки по продольной оси чугунного стержня производился в трех точках на поверхности образца к концу процесса сварки на расстояниях от стыка 2,5 и 10 мм.

Сварка производилась непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Режимы сварки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Способ сварки	Режим сварки	Вторич. напряж., в	Время подогрева, сек	Время оплавления, сек	Средняя скорость оплавления, мм/сек	Величина осадки, мм	Давление, кг
Непрерывным оплавлением	А-1	6,4	—	5	1,2	2,0	700
	А-2	6,4	—	9	1,2	2,0	700
	А-3	6,4	—	12	1,2	2,0	700
Оплавлением с подогревом	Б-1	6,4	6	5	1,2	2,0	700
	Б-2	6,4	12	5	1,2	2,0	700

Установлено, что термические циклы для режимов А-2 и А-3 практически равноценны, что свидетельствует о достижении состояния, близкого к квазистационарному. При таком термическом цикле скорость охлаждения в сечении $x=2$ мм сравнительно высока. Предельное ее значение в интервале температур от 800°C до точки мартенситного превращения 300°C составляет $10\text{--}12$ град/сек. Это существенно выше той критической скорости охлаждения, при которой фиксируется образование равновесных структур (по данным Богачева эта скорость составляет 6 град/сек). При таких скоростях охлаждения, как показывают металлографические исследования, в стыке наблюдается троститосорбитная структура, зерна окаймлены тонкой цементитной сеткой, микротвердость составляет 330 кг/мм². Графит точечный, площадь, занятая графитом, — 3%. В отдельных небольших участках наблюдается ледебурит.

В зоне термического влияния на расстоянии 3 мм от стыка образуется структура остаточного аустенита, в зернах которого имеется выделение среднеигльчатого мартенсита, причем от стыка в сторону основного металла в зоне термического влияния количество остаточного аустенита падает, а количество иголок мартенсита в нем растет. Площадь, занятая аустенитом, — $15\text{--}20\%$. Графит пластинчатый, пластинки графита — длинные и толстые. Встречается розеточный графит. Площадь, занятая графитом, — 12%.

Наличие ледебурита и мартенсита в стыке и зоне термического влияния повышает хрупкость сварного соединения и затрудняет обрабатываемость.

При сварке оплавлением с подогревом (режим Б-2) скорость охлаждения после сварки в этих же сечениях составляла $5\text{--}6$ град/сек. Снижение скорости охлаждения после сварки приводит к образованию уже иных структур. В этом случае в стыке образуется мелкопластинчатый перлит с небольшими включениями феррита. Площадь, занятая перлитом, — $70\text{--}80\%$, микротвердость перлита — $242\text{--}244$ кг/мм². Графит в стыке — мелкопластинчатый. Площадь, занятая графитом, — 3%.

Структура зоны термического влияния — мелкопластинчатый перлит. Площадь, занятая перлитом, — 70%; микротвердость перлита — 242 кг/мм². Феррит, окаймляющий пластинки графита, расположен небольшими участками. Графит пластинчатый, средnezавихренный. Площадь, занятая графитом, — $8\text{--}12\%$.

Что касается структурных превращений на расстоянии от стыка более 3 мм, то они, по данным наших исследований, как при сварке непрерывным оплавлением, так и оплавлением с

подогревом практически не изменяются. В целом структура этого участка соответствует структуре основного металла.

Изменения структур в стыке и зоне термического влияния в зависимости от способов и режимов сварки хорошо согласуются с прочностными свойствами сварного соединения.

Образцы, сваренные на режимах А-1, А-2 и Б-1, Б-2, подвергались испытаниям на разрыв, изгиб и ударную вязкость; результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Режим сварки	Средние механические свойства		
	предел прочности при изгибе, кг/мм ²	предел прочности при разрыве, кг/мм ²	ударная вязкость, кг/см ²
А-1	32,1	16,2	0,19
А-2	30,8	16,9	0,23
Б-1	40,0	20,8	0,41
Б-2	41,6	23,2	0,47
Основной металл	43,1	21,8	0,57

Как видно из табл. 2, механические свойства соединений образцов, сваренных на режимах А-1 и А-2, ниже свойств основного металла. Для режимов Б-1 и Б-2 соединения примерно равнопрочны основному металлу.

Расчет температурных полей по методикам Н. Н. Рыкалина и А. И. Пугина для сварки непрерывным оплавлением и с подогревом показал, что эти методики, апробированные на стали, вполне приемлемы и для случая сварки чугуна.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЧУГУНА ОПЛАВЛЕНИЕМ

Характер влияния параметров режима стыковой сварки на качество сварного соединения изучен в полной мере для сварки сталей и некоторых цветных металлов.

В целях выработки рекомендации для выбора режимов сварки чугуна эти параметры были подвергнуты дополнительным исследованиям.

1. Установочная длина

Установочная длина l зависит от сечения свариваемых чугунных деталей, а при сварке труб — от диаметра и толщины стенки. Как показано было ранее, чугун при стыковой сварке весьма чувствителен к термическим режимам и склонен к закалке. Установочная длина играет заметную роль в создании температурного поля, что обусловлено высоким электрическим сопротивлением чугуна и повышенной интенсивностью нагрева протекающим током. При заниженной установочной длине проявляется охлаждающее действие губок. Поэтому установочная длина при сварке чугуна оплавлением, особенно при непрерывном оплавлении, из-за склонности его к подкалке берется на 20—30% больше, чем при сварке малоуглеродистой стали.

2. Параметры режима предварительного подогрева

Подогрев при сварке оплавлением осуществляется либо непрерывным или прерывистым пропуском тока через замкнутые свариваемые детали, либо замыканием свариваемых деталей под напряжением (подогрев прерывистым оплавлением).

Более приемлемым для сварки чугуна оказался подогрев прерывистым оплавлением.

Металлографическим исследованием установлено, что режимы подогрева в значительной мере определяют структуру металла в зоне сварки. Предварительный подогрев существенно снижает градиент температуры и последующую скорость охлаждения, что устраняет опасность появления структур закалки и ледебурита в сварном соединении.

В целом, как показало исследование, сварка без подогрева по прочности существенно уступает сварке с подогревом. Поэтому для сварки серого чугуна был принят основной технологический способ — сварка оплавлением с предварительным подогревом. При сварке стержней $\varnothing 30$ мм оптимальное количество циклов подогрева составляет $10 \div 12$, при сварке труб 50×6 оно колеблется в пределах 20—25. Длительность каждого цикла подогрева 0,8—1,2 сек.

3. Параметры оплавления

Параметрами процесса оплавления являются: напряжение холостого хода U_{20} , скорость оплавления V , величина оплавления Δl .

Необходимое вторичное напряжение и скорость оплавления для сварки чугуна определялись опытным путем. При этом

учитывалось влияние их на распределение температуры, на степень неровностей торцовых поверхностей и на течение процесса оплавления. Для сопоставления подобные опыты были проведены и для малоуглеродистой стали. Установлено, что с ростом напряжения холостого хода градиент температуры увеличивается. Для чугуна эта зависимость проявляется сильнее, чем для стали. Объясняется это тем, что с повышением вторичного напряжения U_{20} сварочный ток падает, вместе с этим уменьшается и его подогревающее действие на установочной длине. Для чугуна с его высоким сопротивлением тепловой эффект работы тока на установочной длине проявляется более резко, чем для стали.

С ростом скорости оплавления температурный градиент как для стали, так и для чугуна неизменно возрастает. Однако для чугуна эта зависимость выражена слабее, чем для стали. Объясняется это также подогревающим действием тока. С ростом скорости ток и его тепловой эффект увеличиваются, что несколько сдерживает рост градиента, обусловленный теплопередачей от подвижного источника (стыка). У чугуна с его высоким электрическим сопротивлением токовый подогрев больше, чем у стали, а суммарное изменение температурного поля оказывается меньшим.

Экспериментально установлено также, что при увеличении как U_{20} , так и особенно скорости оплавления V заметно усиливается степень неровности торцов вследствие более интенсивного течения процессов взрыва перемычек. Замечено, что в глубоких лунках может оставаться жидкая фаза с образованием ледебурита. Следует заметить, что в целом при сварке чугуна неровность торцов меньше, чем при сварке стали.

Выбор заниженной скорости оплавления сопровождается неустойчивостью оплавления с появлением более или менее длительных пауз. Это ослабляет защитное его действие против окисления, не обеспечивает условий для образования сплошной жидкой пленки и равномерного нагрева на всей поверхности торцов. В целом как завышение, так и занижение скорости оплавления отрицательно сказывается на качестве сварного соединения. Для чугуна она берется на 30—50% меньше, чем для стали.

Выбор U_{20} должен удовлетворять как возбуждению, так и нормальному течению оплавления. Минимальное напряжение холостого хода, требуемое для возбуждения оплавления, для чугуна в связи с его высоким электрическим сопротивлением, как показали опыты, несколько выше, чем для стали. При сварке стержней $\varnothing 15—30$ мм на машине типа АС-100 оно составляет (1,2÷1,3) для стали. Подогрев снижает $U_{20 \text{ min}}$,

но в меньшей мере, чем для стали. Припуск на оплавление при сварке без подогрева должен выбираться не меньшим, чем требуется для стабилизации температурного поля, движущегося вдоль оси стержней. По данным Ниппса, минимальный по этому условию припуск связан со скоростью оплавления V и температуропроводностью «а» зависимостью вида $\Delta l_{\text{опл}} = K \frac{a}{V}$.

Опытным путем было установлено, что сварка чугуна должна происходить при более увеличенном припуске на оплавление, чем сварка стали. Эта разница примерно равна 15—20% и согласуется с разницей в температуропроводности (для серого чугуна «а» = 0,17 см²/сек против 0,11 = 0,14 см²/сек для малоуглеродистой стали). Сварка с подогревом требует значительно меньшего припуска, так как температурное поле после подогрева при последующем оплавлении изменяется очень мало и припуск назначается в большей мере для выравнивания нагрева по торцам и создания устойчивой газовой среды и жидкого слоя. Поэтому общий припуск берется в 1,2 ÷ 1,5 раза меньше, чем при сварке непрерывным оплавлением.

4. Параметры осадки

При стыковой сварке оплавлением осадка определяется следующими параметрами: скоростью осадки, величиной осадки и удельным давлением. Экспериментально установлено, что все параметры осадки при сварке серого чугуна могут быть значительно понижены по сравнению со сваркой малоуглеродистой стали. Так, оптимальная скорость осадки при сварке чугуна с подогревом составляет 6—8 мм/сек и при непрерывном оплавлении — 8—12 мм/сек вместо 15—20 мм/сек для сварки малоуглеродистой стали.

Возможность уменьшения скорости осадки при сварке чугуна обусловлена меньшей опасностью его окисления, так как при высоком содержании углерода газовая среда в полости зазора, как показали опыты, имеет большее, чем при сварке стали, содержание СО и обладает поэтому более высокими защитными свойствами; углерод в чугуне, кроме того, сам несколько тормозит окислительные процессы. Умеренная скорость осадки в известной мере связана также с относительно небольшой величиной осадки.

Оптимальная величина осадки при сварке чугуна оплавлением была установлена опытным путем. Данные механических испытаний и металлографического контроля позволили установить, что оптимальная величина осадки для сварки серого

0400067

чугуна сечением 700—1500 мм² должна выдерживаться в пределах от 1,2 до 3 мм.

Удельное давление осадки так же, как и при сварке стали, зависит от сечения свариваемых деталей (оно должно несколько возрастать с увеличением диаметра стержня) и от условий их нагрева, т. е. от градиента температуры.

При чрезмерно большой величине осадочного давления по периметру стыка в зоне соединения образуются трещины. При недостаточной величине осадочного давления в стыке наблюдаются участки непровара и частицы удаленного при осадке жидкого металла, закристаллизовавшегося в виде ледебуритных включений. Непровары и ледебуритные включения в стыке в сильной мере понижают механическую прочность сварного соединения.

Отступление от оптимальных значений осадочного давления в сторону уменьшения или увеличения приводит к снижению механических свойств сварных соединений.

При сварке оплавлением с подогревом оптимальное давление находится в пределах 3—4 кг/мм²; при сварке непрерывным оплавлением — 5—6 кг/мм².

Найденные опытом давления осадки в целом хорошо согласуются с зависимостью прочностных свойств чугуна от градиента температуры.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЧУГУНА СО СТАЛЬЮ

В работе [2] показано, что в отличие от всех других широко известных способов сварки контактная стыковая сварка является простым и доступным средством равнопрочного соединения чугуна со сталью. Исследование этого процесса проводилось на образцах $\varnothing 30$ мм из чугуна СЧ21-40 и стали марок Ст.20, Ст.40 и Ст.45Х. Сварка велась методом оплавления с подогревом. Режимы приводятся в табл. 2.

В силу более высокого электрического сопротивления чугунные заготовки при одинаковой плотности тока нагреваются значительно быстрее, чем стальные. Для обеспечения условий одинакового нагрева установочная длина стальных образцов бралась большей, чем для чугунных. Для чугуна она составляла 25—28 мм и для стали — 45—50 мм.

После полного охлаждения сварные заготовки подвергались контролю (внешний осмотр), а также металлографическим исследованиям, механическим испытаниям и испытаниям на обрабатываемость.

Микроструктура в стыке и зоне термического влияния зави-

сит от состава свариваемого материала, режимов сварки и способа охлаждения образцов после сварки.

Таблица 2

Данные о режимах сварки

Режим сварки	Свариваемый материал	Способ охлаждения	Вторичное напряжение, в	Время подогрева, сек	Время оплавления, сек	Припуск на подогрев, мм	Припуск на оплавление, мм	Припуск на осадку, мм
Б-3	Ст. 20 + СЧ21-40	на воздухе	5,1	14—15	4	2—2,5	4—6	1,5—2
Б-4	"	"	5,1	14—15	4	2—3	4—6	2,5
Б-5	"	"	5,1	14—15	3,5—4	3—3,5	4—6	2,5—3
Б-6	Ст. 20 + СЧ21-40	на воздухе	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	2—2,5
Б-7	"	"	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	3
Б-8	Ст. 45 + СЧ21-40	"	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	3
Б-9	"	сразу после сварки в печи с температурой 500—550°С, затем в песке	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	3
Б-10	Ст. 45Х + СЧ21-41	"	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	3,1—3,5
Б-11	"	на воздухе	5,8	14—15	3,5—4	7—7,5	5—6	3,1—3,5
Б-12	Ст. 20 + СЧ21-40	на воздухе	5,1	10—11	3,5—4	3	5	3—3,1
Б-13	"	"	5,1	20—22	4—5	4	7	3—3,5
Б-14	Ст. 20 + СЧ21-40	на воздухе	5,8	10—11	3,5—4	5	5—6	2—3
Б-15	"	"	5,8	20—22	5	8—10	8,5	2,5—3

Заготовки из стали марок Ст.20 и Ст.45 в начальном состоянии имели феррито-перлитную структуру. При всех режимах сварки и охлаждения на воздухе в зоне термического влияния стали наблюдается образование участков неполной и полной нормализации с размельченным зерном и участка перегрева с крупнозернистой видманштеттовой структурой. Аналогичные структуры имеются также на сталях Ст.45, когда образцы сразу после сварки помещались в печь с температурой 500—

550°C и затем медленно охлаждались в ящиках с песком. Однако в этих случаях медленное охлаждение обеспечивало полную дифференциацию феррита и перлита в участках перегрева без образования видманштеттовой структуры.

Образцы из стали Ст.45Х, охлажденные после сварки на воздухе, имеют участок (размером 5 мм) мартенситно-ферритовой структуры, переходящей по мере удаления от стыка в мелкозернистую сорбитоферритовую структуру.

Характерным для всех опытных образцов является изменение химического состава свариваемых материалов возле стыка — образование науглероженной полосы на стальных заготовках и обедненной по углероду области на чугунах.

Структура науглероженной полоски изменяется от перлитно-ферритной — со стороны, противоположной стыку, до перлитной в средней части полосы и перлит-цементитной — у стыка.

Металлографический анализ показал, что в месте стыка содержание углерода со стороны чугуна и стали близки и соответствуют эвтектидной концентрации углерода.

Науглероживание металла стальных образцов, как и обеднение углеродом расплавленного чугуна, можно объяснить действием интенсивной диффузии углерода из чугуна в сталь.

В комбинированных стыках, полученных методом оплавления, как правило, наблюдаются общие для обеих заготовок зерна и образуется видимая полоса раздела. Можно предположить, что выравнивание концентрации углерода в стальной и чугунной заготовках способствует образованию монолитной структуры с общими зернами.

Таблица 3

Свариваемый материал	Режим сварки	Способ охлаждения	Предел прочности при изгибе, кг/мм ²	Стрела прогиба, мм	Предел прочности при растяжении, кг/мм ²	Ударная вязкость, кг.м/см ²
Ст. 20 + СЧ21-40	Б-3	на воздухе	43,6	2,7	21,3	0,4
То же	Б-13	"	43,2	2,8	22,1	0,41
Ст. 45 + СЧ21-40	Б-9	сразу после сварки в печи с температурой 500—550°C, затем в песке	43,8	3,1	21,6	0,48
Ст. 45Х + СЧ21-40	Б-9	"	43,7	3,5	23	0,5

Комбинированные соединения проходили механические испытания на изгиб, разрыв и удар и подвергались также испытанию на обрабатываемость.

Испытания на изгиб производились согласно ГОСТу 2055—43 на образцах диаметром 30 мм и длиной 340 мм. Расстояние между опорами составляло 300 мм. Разрывные образцы изготавливались по ГОСТу 1412—48. Испытания на удар производились на образцах без надреза с размерами 20×20×100 мм.

Результаты механических испытаний приводятся в табл. 3.

Как видно из таблицы, пределы прочности при изгибе и растяжении сварных соединений и чугунных образцов примерно одинаковы. Стрела прогиба и ударная вязкость комбинированных соединений несколько ниже, чем у чугуна. Металлографический анализ показывает, что разобщенные включения ледебурита в стыке на механические свойства практически не влияют.

Для исследования стойкости режущего инструмента были сварены образцы из чугуна СЧ21-40 и сталей марок Ст.20, Ст.45 и Ст.45Х. Сварка производилась на режимах Б-3 и Б-13. Образцы из Ст.45Х и Ст.45 сразу после сварки загружались в печь для медленного охлаждения.

Обрабатываемость комбинированных соединений оценивалась путем сопоставления стойкости режущего инструмента при точении сварных образцов и отдельно чугунных и стальных заготовок. Обработка производилась резцами с пластинами ВК8 на режимах: скорость резания — 80 м/мин, подача суппорта — 0,2 мм/об, глубина резания — 2 мм.

В процессе обработки сравнивались величина и характер износа резцов при обработке стального участка образца, чугунного и среднего участка образца, включающего зону термического влияния и стык. Длина прохода на каждой части образца бралась одинаковой.

Исследования показали, что величина и характер износа резцов при обработке сварного стыка, зоны термического влияния и цельных заготовок из чугуна и стали примерно одинаковы.

ВНЕДРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЧУГУНА И ЧУГУНА СО СТАЛЬЮ В ПРОИЗВОДСТВО

Результаты исследования стыковой сварки чугуна и чугуна со сталью, в частности, общетехнологические особенности и экономические показатели этого процесса имеют большой интерес для многих предприятий. Совместно с работниками завода автором на Челябинском тракторном заводе была начата

и успешно проведена работа по внедрению стыковой сварки чугуна со сталью в производство на крышке всасывающей трубы трактора С-100.

Узел всасывающей трубы предназначен для выхлопа газов при работе пускового мотора. Он представляет собой чугунную крышку с кронштейном, в расточенный конец которой вставляется стальная выхлопная труба. Согласно ранее существовавшему технологическому процессу соединение чугунной крышки со стальной трубой производилось с помощью дуговой сварки. Длительная практика производства и эксплуатации показала, что дуговая сварка не обеспечивает достаточной прочности соединения и приводит к массовому браку по отрыву стальной трубы от чугунной крышки.

На основании проведенного исследования и экспериментальных работ по этому узлу завод стал изготавливать крышки всасывающей трубы с помощью контактной сварки.

Для внедрения производственной операции стыковой сварки была использована машина АС-100. В целях повышения производительности машина подверглась модернизации. Ручной зажим был заменен пневматическим, для точной и быстрой фиксации узла предусмотрено специальное приспособление. Стыковая машина установлена в поточную линию обработки крышки всасывающей трубы. Сварка производится на режимах, установленных в процессе исследования и отладки. Охлаждение проводится на воздухе.

Внедрение нового техпроцесса обеспечило существенное повышение технико-экономических показателей.

Производительность сварочной операции увеличилась в 2,6 раза, экономия электродов на один трактор составляет 50 г.

Качество сварки настолько улучшилось, что брак был ликвидирован. Завод рекламаций по узлу при новой технологии не имеет; кроме того, улучшились условия труда. За разработанный и внедренный новый техпроцесс данная работа была отмечена премией центрального правления НТО Машпрома.

На Первоуральском старотрубном заводе автором совместно с коллективом завода была отработана и внедрена в производство технология исправления брака чугунных водопроводных труб $\varnothing 50$ мм с помощью контактной стыковой сварки.

Общая схема технологического процесса исправления брака следующая: а) разбраковка труб, наметка и вырезка здоровых частей с расчетом возможности их комплектации для сварки плетей нормальной длины; б) мерная торцовка труб на трубообрезном станке и здесь же зачистка контактных поверхностей с помощью приспособления, установленного на

суппорте обрезаемого станка; в) сварка и удаление грата; г) контроль качества; д) окончательная отделка труб по существующему основному процессу. Все операции целесообразно сосредоточить на отдельном участке. Сварка ведется на машине мощностью 180 *кв*а с двухсторонним подводом тока, пневмогидравлическим проводом зажатия, ручным приводом оплавления и автоматическим пневмогидравлическим приводом осадки.

Сварка осуществляется оплавлением с подогревом по отработанным режимам. Удаление грата производится с помощью дорна автоматическим устройством.

Следует заметить, что задача сохранения проходного сечения при сварке чугуновых труб решается сравнительно легче, чем при сварке стальных труб, ввиду того что утолщение основного металла очень мало, а капли расплавленного и быстро охлажденного металла хрупки и слабо сцеплены с поверхностью отливки.

Основным способом контроля испытания на герметичность и прочность принято опрессование водой под давлением 35 *атм* при обстукивании трубы слесарным молотком.

Внедрение стыковой сварки как средства исправления чугуновых труб дает экономию заводу 25 тыс. руб. в год. Ближайшей перспективой является освоение на заводе производства сварно-литых труб, отливаемых на малогабаритных центробежных машинах.

В настоящее время ведутся работы по освоению и внедрению стыковой сварки чугуновых канализационных труб \varnothing 50 и 100 *мм* на предприятиях треста «Южуралсантехмонтаж».

Для сварки этих труб модернизирована стыковая машина МСМ-150. Модернизации подвергались все основные элементы машины: механизм зажатия, механизм осадки и электрическая схема. Цикл сварки на этой машине полностью автоматизирован. Автоматическое управление процессами сварки осуществляется программным устройством.

ВЫВОДЫ

1. Процесс стыковой сварки чугуна характеризуется существенными особенностями, правильный учет которых является необходимым условием получения доброкачественного соединения. Эти особенности проявляются в течении процесса пластического деформирования, в физико-металлургических и энергетических процессах при оплавлении и осадке, и в энергетических процессах при возбуждении и оплавлении.

2. Выбор тепловых и механических параметров осадки определяется прежде всего опасностью разрушения металла в околостыковой зоне. Поэтому в отличие от всех других случаев стыковой сварки стали и сплавов для сварки чугуна оказалось необходимым ввести понятие о технологической прочности и исследовать этот вопрос с его практической стороны. Установлено, что с повышением градиента температуры технологическая прочность растет, а с понижением — падает. Зависимость технологической прочности от градиента достаточно точно аппроксимируется экспонентой. Зависимость имеет непосредственное значение для практики выбора оптимальных режимов нагрева и осадки при стыковой сварке чугуна и чугуна со сталью.

3. Для стыковой сварки серого чугуна принципиально важным условием получения прочного соединения является нагрев поверхности торцов выше точки плавления. При этом структурно свободный графит, препятствующий образованию металлических связей, растворяется в жидкости. Под воздействием давления основная масса жидкости, обогащенная углеродом, вытесняется, и соединение в момент осадки возникает как процесс сращивания зерен металла в состоянии аустенита. Последующие структурные превращения во вновь возникающих зернах приводят к образованию структур в стыке, близких к структуре основного металла. Частично оставшаяся в стыке жидкость в зависимости от скорости охлаждения может привести к образованию хрупкой ледебуритной составляющей или графитной эвтектики с удовлетворительными механическими свойствами.

4. В зависимости от термических режимов сварки в стыке и зоне термического влияния могут образоваться различные структуры (мартенсит, тростит, сорбит):

а) при сварке оплавлением с подогревом существует достаточно широкий для практики диапазон режимов, обеспечивающий сварное соединение без ледебуритных составляющих в стыке и без структур закалки в зоне термического влияния;

б) при сварке непрерывным оплавлением, вследствие присущих этому методу высокого температурного градиента и скорости охлаждения, в сварном соединении могут образоваться неравновесные структуры (мартенсит, тростит), а также отдельные включения ледебурита в стыке.

5. Установлено, что новейшие методы расчета распределения температуры, апробированные для стали, вполне приемлемы и для случаев сварки чугуна.

6. Сравнительные исследования влияния отдельных параметров режима сварки на качество соединения показали:

а) напряжение холостого хода при сварке чугуна значительно повышает градиент температуры и более сильно, чем для стали. На степень неровности торцов чугуна напряжение холостого хода влияет меньше, чем для стали;

б) прямая зависимость градиента температуры от скорости оплавления для чугуна проявляется менее заметно, чем для стали. При увеличении скорости оплавления степень неровности поверхности торцов возрастает, что повышает вероятность застревания крупных включений жидкого расплава с последующим образованием ледебурита;

в) установочная длина при сварке чугуна на температурное поле и качество соединения играет большую роль, чем при сварке малоуглеродистой стали. В целях снижения градиента температуры и последующей скорости охлаждения установочная длина для сварки чугуна должна приниматься на 20—30% больше против требуемой при сварке стали;

г) минимальное напряжение холостого хода для чугуна оказалось выше, чем для стали. Подогрев снижает минимальное напряжение, но в меньшей мере против сварки стали.

7. Механические свойства сварных соединений, полученных при сварке оплавлением с подогревом, по пределам прочности при изгибе, растяжении, по величине стрелы прогиба и по ударной вязкости практически равноценны основному металлу. Сварка непрерывным оплавлением дает относительно пониженные механические свойства.

8. При надлежащем выборе параметров возможна стыковая сварка чугуна со сталью с получением устойчиво высоких показателей прочности.

9. Выявлены интересные явления процесса в части диффузии углерода из чугуна в сталь, изучены структуры стыка и зоны термического влияния и их связь с режимом сварки, установлены оптимальные параметры режима, найдено, что параметры осадки обуславливаются теми же факторами, что и при сварке чугуна с чугуном.

10. Результаты исследований получили практическое применение в ряде производств. Контактная стыковая сварка чугуна и чугуна со сталью была внедрена на Челябинском тракторном заводе на узле крышки всасывающей трубы трактора С-100, на Первоуральском старотрубном заводе при исправлении брака чугунных водопроводных труб $\varnothing 50$ мм и внедряется при изготовлении чугунных труб канализационных систем на предприятиях треста «Южуралсантехмонтаж».

Комплексное исследование стыковой сварки чугуна и чугуна со сталью и внедрение ее в производство даст большой эффект народному хозяйству страны.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. И. Р. Пацкевич, В. М. Шахматов. Исследование контактной стыковой сварки чугуна. «Сварочное производство», 1955, № 5.
2. И. Р. Пацкевич, В. М. Шахматов. Исследование контактной стыковой сварки чугуна и чугуна со сталью. «Вопросы сварочного производства», ЧПИ, вып. 16, Машгиз, 1959.
3. В. М. Шахматов. Опыт контактной стыковой сварки чугуна со сталью на Челябинском тракторном заводе. «Технология и оборудование контактной сварки», ГОСИНТИ, 1963.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ДОЛОЖЕНЫ:

- а) на Всесоюзном совещании работников трубной промышленности, г. Днепропетровск, 1962;
- б) на XIV научно-технической конференции ЧПИ, 1961;
- в) на XV научно-технической конференции ЧПИ, 1962.

-
4. Новые технологические процессы и оборудование для сварки № 4-63-571/30
В.М. ШАХМАТОВА, А.С. РУДАКОВА, К.А. Гринберг
и других.
Опыт стыковой сварки чугунных труб
"Передовой научно-технический и производственный опыт"; ГОСИНТИ, 1963 .

ФБ01224. 21/V 1963 г.

Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Тираж 150. Заказ 689.

Объем 1,5 печ. л.