

БИБЛИОТЕКА

**ЭКСПЛУАТАЦИОННИКА
МАГИСТРАЛЬНОГО
ГАЗОПРОВОДА**

**В. Д. ТАРЛИНСКИЙ, Е. М. РОГОВА,
Н. П. СБАРСКАЯ**

**ЭЛЕКТРОДЫ,
ФЛЮСЫ И ПРОВОЛОКИ
ДЛЯ СВАРКИ
ТРУБОПРОВОДОВ**

И Е Д Р А · 1975

**БИБЛИОТЕКА ЭКСПЛУАТАЦИОННИКА
МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА**

**В. Д. ТАРЛИНСКИЙ, Е. М. РОГОВА,
Н. П. СВАРСКАЯ**

**ЭЛЕКТРОДЫ, ФЛЮСЫ
И ПРОВОЛОКИ
ДЛЯ СВАРКИ
ТРУБОПРОВОДОВ**

ПОД РЕДАКЦИЕЙ В. Д. ТАРЛИНСКОГО



**Ленинград
«Н Е Д Р А»
Ленинградское отделение
1975**

Тарлинский В. Д., Рогова Е. М., Сбарская Н. П. Электроды, флюсы и проволоки для сварки трубопроводов. Л., «Недра», 1975. 96 с. (Библиотека эксплуатационника магистрального газопровода).

В книге освещаются современное состояние и перспективы развития сварочных материалов, а также практика их использования в строительстве магистральных трубопроводов в нашей стране и за рубежом. Рассмотрены требования к сварочным материалам и их классификация. Даны промышленные марки зарубежных и отечественных электродов, флюсов, проволок и рекомендации по их применению в зависимости от конкретных условий прокладки и эксплуатации трубопроводов. Исследуется влияние различных металлургических характеристик сварочных материалов на качество металла шва монтажных кольцевых стыков.

Книга предназначена для работников промышленности и строительства, занятых вопросами электродуговой сварки, а также сооружения и эксплуатации магистральных трубопроводов.

Табл. 47, ил. 26, прил. 1, список лит. 32 назв.

Редакционная коллегия:

С. Ф. Бармин (председатель), *И. А. Митрофанов* (зам. председателя), *Г. С. Андреев*, *Е. Н. Тихомиров*

Вадим Давыдович Тарлинский, Елена Михайловна Рогова, Наталья Петровна Сбарская

ЭЛЕКТРОДЫ, ФЛЮСЫ И ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Редактор издательства Д. М. Брускин Техн. редактор А. Б. Яцуржинская
Корректор Н. Д. Баримова

Сдано в набор 16/IV 1975 г. Подписано в печать 29/IX 1975 г. М-31828. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага тип. № 2. Печ. л. 6. Уч.-изд. л. 6,29. Тираж 13600 экз. Заказ 225/245.
Цена 22 коп.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение.
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 31.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От издательства	4
Введение	5
Глава I. Промышленные отечественные и зарубежные сварочные материалы	7
Требования к сварочным материалам	—
Классификация сварочных материалов	8
Электроды для ручной дуговой сварки	11
Проволоки и флюсы для автоматической сварки	27
Порошковые проволоки, перспективные для сварки в трубопроводном строительстве	37
Сварочные материалы для механизированной газоэлектрической сварки	41
Глава II. Особенности физико-химических процессов сварки стыков труб	45
Металлургическая и технологическая роль связующих	—
Металлургическая и технологическая роль сварочных шлаков	51
Кремне- и марганцевосстановительные процессы	56
Раскисление и легирование металла шва	59
Образование и роль неметаллических включений в металле шва	65
Поглощение газов металлом шва	68
Глава III. Влияние сварочных материалов на свариваемость трубных сталей и эксплуатационную надежность сварных стыков трубопроводов	76
Влияние сварочных материалов на диффузию и распределение H ₂ в сварном соединении	—
Роль сварочных материалов в обеспечении стойкости монтажных сварных соединений против холодных и кристаллизационных трещин	80
Заключение	92
Приложение	93
Список литературы	95

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

С каждым годом в Советском Союзе увеличивается добыча природного газа, строятся и вводятся в эксплуатацию тысячи километров магистральных газопроводов, постоянно растет армия работников, обслуживающих их.

Чтобы обеспечить книгами кадры массовых профессий, Ленинградское отделение издательства «Недра» совместно с объединением Лентрансгаз в 1963 г. предприняло издание серии «Библиотека эксплуатационника магистрального газопровода», посвященной эксплуатации и ремонту магистральных газопроводов.

Книги, входящие в «Библиотеку», освещают вопросы организации эксплуатации магистральных газопроводов, их продувки и испытания, обслуживания линейной части, ведения огневых и газоопасных работ, эксплуатации и ремонта газомоторных, электроприводных, газотурбинных компрессорных станций, газораспределительных станций, а также вопросы связи на магистральных газопроводах, электрозащиты, телемеханики. В отдельных книгах описываются химический контроль на магистральных газопроводах и компрессорных станциях, экономика дальнего транспорта газа, техника безопасности и охрана труда и т. д.

Книги «Библиотеки» в основном предназначены для подготовки и повышения квалификации кадров массовых профессий — мастеров, операторов, слесарей и других категорий эксплуатационного и ремонтного персонала. Отдельные выпуски рассчитаны на инженерно-технических работников магистральных газопроводов.

В течение 1963—1974 гг. выпущена в свет 31 книга. Учитывая, что спрос на «Библиотеку» растет, издательство с 1965 г. начало переиздание отдельных выпусков. Наряду с этим продолжается издание новых книг.

Ваши замечания и отзывы по уже выпущенным книгам, а также пожелания по выпуску новых просим направлять по адресу: 193171, Ленинград, С-171, Фарфоровская ул., 12, Ленинградское отделение издательства «Недра». Издательство учтет все пожелания и предложения и организует выпуск книг на интересующие Вас темы.

Информацию о готовящихся к изданию книгах «Библиотеки» можно получить в магазинах местных книготоргов по публикуемому ежегодно Темпланам издательства.

Для приобретения книг «Библиотеки» надо до выхода их в свет направить заказ в магазины местных книготоргов или в магазин «Недра» Ленинград по адресу: 199178, Ленинград, В-178, Средний пр., 61. По выходе из печати книги будут высланы почтой наложенным платежом.

ВВЕДЕНИЕ

Правильный выбор сварочных материалов при строительстве магистральных трубопроводов во многом определяет как производительность сварочно-монтажных работ, так и качество кольцевых сварных соединений. Сварочные материалы необходимо выбирать так, чтобы металл шва обеспечивал требуемый комплекс свойств и особенно надежность сварных соединений.

Сварочные материалы для трубопроводного строительства должны обладать рядом достаточно строго регламентированных характеристик: 1) повышенной производительностью наплавки, маневренностью и универсальностью; 2) технологичностью; 3) защитными и заданными физико-металлургическими свойствами.

Первая группа характеристик сварочных материалов предопределяет выбор наиболее рациональных организационных схем монтажной сварки, уровень поточности сварочных операций, степень их дифференциации по элементам, темп сварочно-монтажных работ и, в определенной степени, темп строительства магистральных трубопроводов в целом.

От технологичности сварочных материалов во многом зависит вероятность возникновения многих потенциальных очагов разрушения магистральных трубопроводов. Опыт строительства и эксплуатации показал, что особую опасность представляют следующие макродефекты монтажных швов: трещины, непровары, шлаковые включения неблагоприятной формы и состава, зашлакованные глубокие подрезы по кромкам свариваемых поверхностей. Образование указанных дефектов, наряду с неправильной технологией сварки, во многом обусловлено неудовлетворительной технологичностью сварочных материалов.

Однако надежность сварных швов определяется также свойствами самого металла шва, т. е. в конечном счете физико-металлургическими и защитными свойствами сварочных материалов. В частности, принципиальное значение имеет деформационная способность металла шва в зоне дефекта (непровара, трещины, подреза, шлакового включения). В зависимости от свойств металла шва при равных условиях внешнего воздействия (температура и напряженное состояние) и при одинаковых природе, форме, размерах и распределении дефектов они могут или явиться очагами

зарождения разрыва, или даже не повлиять на процесс разрушения.

Основными причинами, вызывающими снижение деформационной способности металла шва, являются: образование пленочных стекловидных и сульфидных включений, обволакивающих и разъединяющих кристаллиты; блокирование дислокаций примесными атомами; выпадение по границам зерен хрупких вторичных фаз; чрезмерное упрочнение металла шва легирующими элементами; появление в сварном соединении закалочных структур или структур перегрева и т. д. Все эти факторы, определяемые сложными металлургическими процессами в сварочной ванне, зависят от металлургического типа применяемых сварочных материалов.

Следовательно, на эксплуатационную надежность кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов оказывают влияние не только макродефекты сварки, являющиеся следствием, в частности, неудовлетворительных сварочно-технологических свойств сварочных материалов, но и свойства самого металла шва, определяемые металлургическим типом сварочных материалов.

ГЛАВА I

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Требования к сварочным материалам

Требования к сварочным материалам, применяемым в трубопроводном строительстве, во многом определяются особенностями сварочно-монтажных работ и условиями эксплуатации кольцевых стыков.

С позиций сварочно-монтажных работ существующая технология многослойной сварки стыков, как правило, предопределяет неоднородность сварного шва, вызываемую различием как химического состава отдельных слоев шва и их структуры, так и непрерывным изменением пространственного положения зоны формирования металла шва.

С позиций эксплуатации сварных швов требования к сварочным материалам предопределяются требованиями к сварным соединениям, испытывающим одновременное воздействие самых разнообразных нагрузок: статических и динамических, растягивающих и изгибающих, пульсирующих и переменных. Сварные соединения трубопроводов должны быть прочными, плотными, иногда даже коррозионно-стойкими. Таким образом, требования к сварочным материалам всегда носят комплексный характер.

Условно требования к сварочным материалам можно разделить на требования к их сварочно-технологическим свойствам и требования к механическим характеристикам металла шва. В свою очередь, обе эти группы требований зависят от того, для сварки каких слоев (корневого или заполняющих) и каких стыков (поворотных или неповоротных) предназначен данный сварочный материал.

К первой группе относятся следующие требования.

1. Обеспечение комплекса свойств, определяемых понятием «монтажная технологичность», т. е. легкое возбуждение и стабильное горение дуги, малая чувствительность к возможным изменениям режима сварки, легкая отделимость шлака, отсутствие «стартовых» пор и т. д.

2. Возможность производить сварку с достаточно высокой скоростью, что определяет перспективность сварки неповоротных стыков сверху—вниз, применения флюсов, позволяющих вести автоматическую сварку на форсированных режимах, и т. д.

3. Универсальность, т. е. возможность качественной сварки неповоротных стыков во всех пространственных положениях без изменения режимов.

4. Наличие определенных физико-химических свойств сварочных шлаков, предотвращающее, в частности, вытекание шлака и металла из сварочной ванны при сварке поворотных стыков на форсированных режимах.

5. Обеспечение значительного проплавливающего действия, гарантирующего при сварке корневого слоя шва формирование плавного обратного валика.

Ко второй группе относятся следующие требования.

1. Обеспечение повышенной деформационной способности и высоких вязкопластических свойств металла корневого слоя, так как большинство разрушений монтажных стыков начинается с корня шва, в местах наибольшей концентрации напряжений у непроваров, подрезов, острых шлаковых включений и т. д. Что же касается требования равнопрочности этого слоя основному металлу, то оно не является доминирующим.

2. Обеспечение равнопрочности заполняющих слоев шва основному металлу. Минимально допустимый предел прочности (σ_B) металла шва должен быть равен нормативному σ_B металла трубы или незначительно превышать его при одновременном достижении требуемого уровня вязкопластических и иногда других свойств металла шва. Это должно в целом определить работоспособность сварного соединения в трубопроводе. Следовательно, возникает необходимость выбора для сварки заполняющих слоев шва сварочных материалов (или их сочетаний) со строго детерминированной системой легирования.

Классификация сварочных материалов

Все марки электродов, флюсов и проволок, применяемых для сварки стыков труб трубопроводов, можно объединить единым понятием — сварочные материалы. Однако термин «сварочные материалы» до настоящего времени не является строгим. Иногда его рассматривают весьма узко, включая в него только электроды, флюсы и проволоки, без защитных газов (каталоги многих зарубежных фирм). Иногда — слишком широко. Так, в это понятие иногда включают такие материалы для сварки давлением, как материалы для электродов контактных машин [7].

Классификация сварочных материалов ввиду их большого разнообразия также весьма затруднена. По существу она не разработана практически ни в СССР, ни за рубежом. Поэтому в настоящее время вряд ли возможно для сварочных материалов, приме-

няемых в трубопроводном строительстве, предложить какой-либо единый вариант классификации. Более целесообразно классифицировать их по нескольким основным признакам: по технологическим характеристикам, по назначению, по содержанию в металле шва вредных примесей и газов. Подобный подход позволяет также выявить некоторые отличительные особенности.

Прежде всего сварочные материалы различаются по тому, предназначены ли они для ручной или механизированной электродуговой сварки. В первом случае используются штучные покрытые электроды четырех типов — с целлюлозным, фтористокальциевым, рутиловым и полимеризующимся покрытиями. Во втором случае используются сварочные проволоки следующих трех типов.

1. Самозащитные порошковые проволоки с рутиловым и фтористокальциевым наполнителями.

2. Проволоки сплошного сечения, требующие преимущественно шлаковой защиты, в сочетании с плавными (кислыми, нейтральными и основными) и керамическими флюсами.

3. Проволоки сплошного сечения, требующие преимущественно газовой защиты, в сочетании с активными защитными газами (CO_2), инертными газами (Ar) и газовыми смесями ($\text{CO}_2 + \text{Ar}$).

За редким исключением, сварочные материалы непосредственно участвуют в процессе металлургической обработки металла шва. Лишь иногда в трубопроводном строительстве, в частности при транспортировке коррозионно-активного газа, применяют для сварки корневого слоя шва вольфрамовые электроды в среде Ar, т. е. сочетание сварочных материалов, не участвующих в металлургической обработке металла шва.

Все сварочные материалы, независимо от их вида и способа сварки стыков магистральных трубопроводов, выбираются в зависимости от конкретных механических свойств свариваемых трубных сталей. Во-первых, они должны соответствовать основному металлу по нормативному σ_B (кроме сварочных материалов, предназначенных для сварки корневого слоя шва). Во-вторых, должны соответствовать ему по деформационной способности и вязкопластическим свойствам. В-третьих, их свойства должны сочетаться с особыми требованиями к металлу трубы, которые определяются условиями прокладки трубопроводов (надземная, наземная, подземная), а также климатической зоной, где происходит прокладка: северная (полярная, арктическая), средняя (умеренный климат), южная (пустыня или, например, влажные тропики) (табл. 1).

Все сварочные материалы подразделяются, исходя из условия свариваемости стыков труб и, в первую очередь, степени опасности образования холодных или горячих трещин в различных зонах сварных соединений (металл шва, зона сплавления, зона термического влияния), которая определяется, в частности, содержанием различных примесей (табл. 2, 3). При этом чем меньше содержание потенциального водорода ($H_{\text{пот}}$) в сварочном материале (в первую

Таблица 1

Классификация сварочных материалов по назначению

Материал свариваемых труб	Условия прокладки
Малоуглеродистые нелегированные трубные стали с σ_B норм ≤ 50 кгс/мм ²	Северное исполнение; прокладка: надземная, подземная Обычное исполнение
Малоуглеродистые низколегированные трубные стали с σ_B норм < 55 кгс/мм ²	Северное исполнение; прокладка: надземная, подземная Обычное исполнение
Стали дисперсионного упрочнения с микродобавками V, Ni, Ti и т. д. с σ_B норм ≥ 55 кгс/мм ²	Северное исполнение; прокладка: надземная, подземная Обычное исполнение
Стали термического упрочнения с σ_B норм = 60 ÷ 75 кгс/мм ²	Северное исполнение; прокладка: надземная; подземная Обычное исполнение

Таблица 2

Классификация сварочных материалов по содержанию водорода

Содержание водорода	Сварочные материалы
Высокое	Электроды: с рутиловым покрытием; с целлюлозным покрытием
Среднее	Электроды: с фтористокальциевым покрытием (влажность покрытия $> 0,5\%$); с полимеризующимся покрытием Самозащитные порошковые проволоки с рутило-силикатным наполнителем Проволока сплошного сечения + нейтральный и основной плавный флюс
Низкое	Электроды с фтористокальциевым покрытием (влажность покрытия $< 0,5\%$) Самозащитные порошковые проволоки с фтористокальциевым наполнителем Проволока сплошного сечения + кислый плавный флюс (инертный газ или газовая смесь; активный газ)
Особо низкое	Низководородистые электроды с фтористокальциевым покрытием (влажность покрытия $\leq 0,1\%$)

очередь предназначенного для сварки корневого слоя шва), тем, при некоторых неблагоприятных условиях, меньше опасность возникновения холодных трещин. Аналогично чем меньше серы, фосфора и других вредных примесей содержат сварочные материалы, тем (но также лишь при некоторых неблагоприятных условиях) меньше опасность возникновения кристаллизационных трещин. Чем сложнее условия монтажа и эксплуатации трубопроводов (низкие температуры сварки, надземная прокладка, вибра-

Таблица 3

Классификация сварочных материалов по содержанию серы и фосфора

Содержание серы и фосфора	Сварочные материалы
Высокое	Электроды с покрытием, содержащим большое количество рудных компонентов Порошковые проволоки с наполнителем, содержащим большое количество рудных компонентов
Среднее	Проволока сплошного сечения + кислый флюс с высоким содержанием рудных компонентов Электроды: с целлюлозным покрытием; с рутиловым покрытием; с полимеризующимся покрытием Порошковые проволоки с рутилосиликатным наполнителем
Низкое	Электроды с фтористокальциевым покрытием Порошковые проволоки с фтористокальциевым наполнителем Проволока сплошного сечения (малоуглеродистая и легированная) + основной флюс (низкомарганцовистый)
Особо низкое	Проволока сплошного сечения + активный или инертный газ Электроды с фтористокальциевым покрытием на проволоке Св-08АА Проволока сплошного сечения Св-08АА + основной флюс, не содержащий рудных компонентов

ционные нагрузки, повышенная толщина стенки трубы), тем в большей степени выбор сварочных материалов определяется низким содержанием в них $H_{пот}$ и вредных примесей. Однако в большинстве случаев применение, например, высоководородистых сварочных материалов (электроды с целлюлозным покрытием) оправдано и целесообразно не только с позиций повышения производительности, но также и с точки зрения обеспечения требуемого качества сварных соединений (гарантированное проплавление корня шва).

Электроды для ручной дуговой сварки

Как в отечественном, так и в зарубежном трубопроводном строительстве электроды до сих пор являются важнейшим сварочным материалом, предназначенным для сварки неповоротных стыков.

В соответствии со стандартами электроды классифицируются по назначению, механическим свойствам металла шва, основным сварочно-технологическим характеристикам и металлургическому типу покрытия (табл. 4).

Обозначения типов электродов по различным стандартам

ISO (международный)	ГОСТ 9467-60 (СССР)	AWS-ASTM (США)	DIN-1913 (ФРГ)	JIS (Япония)
E243T22	Э46-Т	E6012	Ti VIIIbs 243/22	D4313
E244C10	Э42-0	E6010	Ze VIIIm 244/22	D4311
E434C10	Э50-0	E7010	Ze VIIIm 434/22	D5011
E534C19	Э60-0	E8010	Ze VIIIm 534/19	D5811
—	Э70-0	E9010-G	Ze VIIIm 634/19	—
E245B26	Э42А-Ф	E7016	Kb IXs 245/26	D4316
E345B26	Э50А-Ф	E7018	Kb IXs 345/26	D5016
E535B26	Э55-Ф	E7015-A1	Kb XIIs 535/26	D5316
E635B26	Э60А-Ф	E8018 G	Kb XIIs 635/26	D5816
D624B26	Э70-Ф	E9018-G	Kb XIVs 624/26	—

По ГОСТ 9467—60 электроды, в том числе предназначенные для трубопроводного строительства (Э), обозначаются двумя цифрами, характеризующими предел прочности металла шва. Если за цифрами следует буква «А», то это означает, что электроды имеют повышенные гарантированные значения пластических свойств (относительного удлинения δ_5 и ударной вязкости a_n). Затем в обозначении электродов следует буква, означающая металлургический тип электродного покрытия: Т — рутиловое, О — органическое (целлюлозное), Ф — фтористокальциевое. Например, индекс Э50А-Ф характеризует электрод общего назначения (Э) с $\sigma_B \geq 50$ кгс/мм² (50), повышенными вязкопластическими свойствами металла шва (А) и фтористокальциевым покрытием (Ф).

По американскому стандарту AWS—ASTM первая буква в обозначении (E) означает электрод общего назначения, первые две цифры — минимальный предел текучести σ_T металла шва в килофунтах на квадратный дюйм, последующая цифра — универсальность электрода (1 — для всех пространственных положений) и, наконец, последняя цифра основного индекса характеризует одновременно как металлургический тип покрытия, так и род тока и полярность (0 — электроды с целлюлозным покрытием только для обратной полярности, 1 — то же, но также и для прямой полярности, 2, 3 и 4 — с рутиловым покрытием; 5, 6 и 8 — с фтористокальциевым покрытием). Иногда к основному индексу добавляется буква или буква с цифрой, которые означают систему легирования металла шва: А1 ($\geq 0,5\%$ Мо); В1 ($\geq 0,5\%$ Cr + $\geq 0,5\%$ Мо); G ($\geq 0,5\%$ Ni + $\geq 0,3\%$ Cr + $\geq 0,2\%$ Мо + $\geq 0,1\%$ V). Например, индекс E7015-A1 характеризует электрод общего назначения (E) с пределом текучести ≥ 70 кфунт/дюйм² ≈ 49 кгс/мм² (70), обладающий универсальностью (1), для сварки как на прямой, так и на обратной полярности, с покрытием фтористокальциевого типа (5) и обеспечивающий в металле шва $\geq 0,5\%$ Мо (А1).

В обозначении электродов по DIN—1913 маркирован металлургический тип электродного покрытия (Ti — рутиловый; Ze — целлюлозный, Kb — фтористокальциевый). Римская цифра и буквенный индекс (VIIIbs, VIIIm, XIVs) обозначают основные особенности электродов, в том числе толщину их покрытия. Затем следуют арабские цифры, характеризующие механические свойства металла шва. Первая из них — σ_B , кгс/мм²; вторая — δ_5 , %, третья — a_n , кгс·м/см² (на образцах ISO).

Первая цифра после дроби обозначает универсальность (1 и 2 — во всех пространственных положениях, в том числе 1 — сверху—вниз) и, наконец, последняя цифра характеризует полярность и требование к напряжению холостого хода U_{xx} источника питания. Например, индекс ZeVIIIm534/19 означает: электрод с целлюлозным покрытием (Ze), имеющий малую толщину покрытия (VIIIm), с $\delta_B \geq 56$ кгс/мм² (5), $\delta_5 \geq 22\%$ (3), $a_n \geq 11$ кгс·м/см² (4), предназначенный для сварки во всех пространственных положениях, в том числе сверху—вниз (1), преимущественно на обратной полярности при $U_{xx} \geq 90$ в (9).

Электроды, выпускаемые по японскому промышленному стандарту JIS и предназначенные для сварки стыков магистральных трубопроводов, обозначаются одной буквой и четырьмя цифрами. Буква D означает электрод общего назначения, первые две цифры характеризуют нормативный предел прочности металла шва на растяжение (кгс/мм²). Следующая цифра соответствует общей характеристике электрода (1 — электрод, не содержащий железного порошка в покрытии, предназначенный для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей). Последняя цифра характеризует электродное покрытие (3 — рутиловое, 1 — целлюлозное; 6 — фтористокальциевое, низководородистое). Например, индекс D5011 — условное обозначение электрода общего назначения (D), с $\sigma_B \geq 50$ кгс/мм², не содержащего в покрытии (1) железного порошка, с целлюлозным покрытием (1).

По международному стандарту ISO первая буква E — означает электрод общего назначения, последующие три цифры аналогичны трем цифрам перед дробью в маркировке по DIN—1913, далее следует буква, характеризующая металлургический тип покрытия (Т — рутиловое, С — целлюлозное, В — фтористокальциевое), последние две цифры в целом (с небольшим различием) совпадают с последними двумя цифрами в маркировке по DIN—1913.

Из сравнения международного стандарта с национальными следует, что в основу международного стандарта был положен стандарт DIN—1913.

В зависимости от назначения трубопровода, температуры сварки стыков труб и эксплуатации сварных соединений, стали свариваемых труб и т. д. рекомендуются типы и марки электродов (табл. 5—7). При выборе электродов и технологии сварки руководствуются необходимостью обеспечения эксплуатационной

Некоторые электроды для сварки заполняющих слоев шва стыков трубопроводов из малоуглеродистых нелегированных сталей с σ_B норм ≤ 50 кгс/мм²

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы			Характеристика электродов			
		$T_{исп}$, °C	$a_{н ср}$ (по 3 образцам), кгс·м/см ²	$a_{н min}$ (единичное значение), кгс·м/см ²	Покрытие	Марка	$a_{н}$, кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C	
А	Северное исполнение, подземная прокладка	-20	≥ 7	≥ 5	Фтористокальциевое	УОНИ-13/45 ВН-48 SH Grün K-50 Fox EV-47	18,0—24,0 15,0—26,0 19,0—22,0 18,0—25,0	16,0—18,0 10,0—13,0 20,6 22,0
	Обычное исполнение, подземная прокладка	0	≥ 7	≥ 5	Целлюлозное	Все электроды группы А BCI-4 Fleetweld 5P Fox Cel	10,0—15,0 10,0—15,0 10,0—16,0	9,0—13,0 9,0—10,0 9,5—12,0
Б					Рутитовое	MP-3 OZC-4 ANO-4 SH Gelb T Fox KE	12,0—12,0	—
							10,0—15,0	—
							8,0—10,0	—

Примечания. 1. Здесь и далее данные по свойствам зарубежных марок электродов приведены на основании результатов испытаний определенных партий (которые не расходуют с данными и рекомендациями фирм-изготовителей) либо по данным каталогов фирм-изготовителей. 2. Во всех случаях, когда это не оговорено особо, значение $a_{н}$ дается по Менаже.

Таблица 6

Некоторые электроды для сварки заполняющих слоев шва стыков трубопроводов из малоуглеродистых низколегированных сталей с σ_B норм < 55 кгс/мм²

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы			Характеристика электродов					
		$T_{исп}$, °C	$a_{н ср}$ (по 3 образцам), кгс·м/см ²	$a_{н min}$ (единичное значение), кгс·м/см ²	Покрытие	Марка	$a_{н}$, кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C			
А	Северное исполнение, надземная и подземная прокладка	-60	$\leq 5,0$	$\geq 3,5$	Фтористо-кальциевое	УОНИ-13/55 Garant Fox EV-50	22,0—24,0	13,0—15,0	10,0—12,0	6,0—8,0
		-40	$\leq 7,0$	$\geq 5,0$			18,0—20,0	13,0—15,0	10,0—13,0	7,0—10,0
Б	Обычное исполнение, подземная прокладка	-20	$\leq 5,0$	$\geq 3,5$	Фтористо-кальциевое	OK Tensitrod	18,0—20,0	14,0—18,0	12,0—14,0	6,0—8,0
		0	$\leq 7,0$	$\geq 5,0$			Все электроды группы А	8,0*	—	—
					Целлюлозное	Shield Arc 85 Fox Cel Mo Phoenix Cel 70	14,0	41,0	7,0	4,0
							16,0—18,0	13,0—15,0	10,0—12,0	6,0—8,0
							—	10,0—16,0	—	—

* $T_{исп} = -30$ °C.

Некоторые электроды для сварки заполняющих слоев шва стыков трубопроводов из малоуглеродистых низколегированных сталей с $\sigma_B \geq 55$ кгс/мм²

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы			Характеристика электродов					
		$T_{исп.} \text{ } ^\circ\text{C}$	a_n ср (по 3 об-разцам) кгс·м/см ²	a_n min (влияние) кгс·м/см ²	Покрытие	Марка	a_n , кгс·м/см ² , при $T_{исп.} \text{ } ^\circ\text{C}$			
А	Северное исполнение, надземная прокладка	-60	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$	Фтористо-кальциевое	BCФ-60 Schwarz-3K Nibaz	0	-20	-40	-60
		-40	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$			16,0	15,0—20,0	12,0—17,0	6,5—9,0 6,0—7,0 7,0
Б	Северное исполнение, подземная прокладка	-40	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$	Фтористо-кальциевое	Все электроды группы А	16,0 16,0 18,0	13,0	8,0	
		-20	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$						
В	Обычное исполнение, подземная прокладка	-20	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$	Фтористо-кальциевое	Все электроды группы А	15,0—18,0 15,0—20,0 15,0	15,0	14,0	8,0—10,0 8,0—16,0
		0	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$						
					Целлюлозное					

* $T_{исп.} = +20 \text{ } ^\circ\text{C}$, по Шарлю.

надежности сварного соединения, а также достаточной производительности сварочно-монтажных работ.

Для сварки корневого слоя шва обычно применяют электроды более «мягкие», а для сварки заполняющих слоев — обеспечивающие равнопрочность сварного соединения с металлом трубы.

При прокладке трубопроводов в сложных климатических условиях (надземная и наземная прокладка), низкой температуре сварки (ниже $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$) к металлу трубы, а следовательно, и к электродам предъявляются повышенные требования, поэтому для сварки применяются электроды, гарантирующие высокую ударную вязкость сварного соединения при отрицательной температуре.

Для трубопроводов надземной и подземной прокладки, монтируемых в северной климатической зоне, рекомендуются только те электроды, которые прошли широкое промышленное опробование в нашей стране при строительстве северных трубопроводов. В меньшей степени (для подземной прокладки) рекомендуются электроды, либо частично опробованные при монтаже трубопроводов в СССР, либо те, которые (по данным зарубежных фирм) имеют наиболее высокие значения a_n при отрицательных температурах. Ниже рассмотрены типы и марки отечественных и зарубежных электродов, применяемых для сварки трех групп трубных сталей.

Для сварки стыков трубопроводов из малоуглеродистых нелегированных сталей с $\sigma_B \leq 50$ кгс/мм² применяются три типа электродов: Э46-Т, Э42-0, Э42А-Ф. При этом стыки труб полностью сваривают электродами одного типа, так как качественные электроды с $\sigma_B < 42$ кгс/мм² для массового применения не выпускаются.

Поскольку из этих труб строят, как правило, магистральные водоводы, то при обычной подземной прокладке разрешается применение электродов с рутиловым покрытием (табл. 8). Наиболее эффективно применять эти электроды при монтаже трубопроводов диаметром до 529 мм. Они обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами, малочувствительны к изменениям сварочного режима и образованию пор (в случае следов ржавчины и смазки на кромках свариваемых труб). Электроды предназначены, как правило, для сварки снизу—вверх со скоростью $v_{св} = 8 \div 9$ м/ч. Металл шва, выполненный этими электродами, имеет повышенное содержание H_2 , O_2 , а также неметаллических включений, и поэтому его вязкопластические свойства сравнительно невысоки.

При монтаже трубопроводов диаметром более 529 мм и подземной прокладке, а также при температуре сварки не ниже $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ целесообразно применение электродов с целлюлозным покрытием (табл. 9). Причем отечественная практика трубопроводного строительства рекомендует применение этих электродов в основном для сварки корневого слоя шва и выполнения горячего прохода, а зарубежная — для сварки всего стыка в целом. Коли-

Таблица 8

Некоторые электроды, соответствующие типу Э46-Т

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %			
	C	Mn	Si	S, P (каждого не более)
MP-3	0,11	0,58	0,17	0,04
OЗС-4	0,10	0,55	0,25	0,04
AHO-4	0,08	0,70	0,10	0,04
SH Gelb T	0,08	0,60	0,25	—
Fox KE	0,05	0,50	0,30	—
OK-46P	0,10	0,50	0,25	—

Продолжение табл. 8

Марка электрода	Механические свойства металла шва и сварного соединения						
	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_s , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C		
					+20	-20	-40
MP-3	48	38	25	65	15,0	—	10,0
OЗС-4	48	39	23	55	12,0	—	8,0
AHO-4	48	37	35	65	15,0	—	10,0
SH Gelb T	45—51	38—43	30—26	—	12,6	10,3	9,8*
Fox KE	48—56	40—48	22—30	45—55	8,0—13,0	—	—
OK-46P	50—54	40—44	24	60	—	—	—

* $T_{исп} = -35$ °C, по Шарпи.

Некоторые электроды,

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %			
	C	Mn	Si	S, P (каждого не более)
BCЦ-4	0,08—0,14	0,25—0,40	0,12—0,20	0,04
Fox Cel	0,08—0,12	0,40—0,60	0,20	0,04
Fleetweld 5P	0,08—0,13	0,40—0,60	0,20	0,03
Elga PL	0,08—0,12	0,40—0,60	0,20	0,04
Citoflex	—	—	—	—
Philips-31	—	—	—	—

чество слоев шва при сварке стыка в целом этими электродами возрастает для труб с толщиной стенки 10—12 мм до 6—8 против 3 при сварке фтористокальциевыми электродами, что позволяет разделить операции, применить поточно-скоростные методы монтажа трубопровода крупными бригадами и повысить темп сварочно-монтажных работ [12].

Электроды целлюлозного типа предназначены для сварки способом сверху—вниз, при этом $v_{св} = 16 \div 25$ м/ч. Благодаря особенностям покрытия эти электроды характеризуются глубоким проплавлением свариваемых кромок, обеспечивают образование равномерного обратного валика. Они малочувствительны к изменениям сварочного режима, наличию следов ржавчины и загрязнений на кромках свариваемых труб. Однако большое содержание целлюлозы в электродном покрытии и его высокая относительная влажность приводят к повышенному содержанию водорода в металле шва, а металлургический тип покрытия способствует также повышенному содержанию силикатных неметаллических включений. Обеспечивая высокую $v_{св}$, целлюлозные электроды позволяют значительно повысить темп сварочно-монтажных работ и рекомендуются для сварки трубопроводов (за исключением некоторых специальных условий).

Для сварки заполняющих слоев шва при монтаже трубопроводов обычного исполнения из нелегированных сталей с $\sigma_B \leq 50$ кгс/мм², а также для сварки корневого и заполняющих слоев шва стыков трубопроводов, прокладываемых в северной климатической зоне, применяются фтористокальциевые электроды типа Э42А-Ф (табл. 10). Сварка осуществляется способом снизу—вверх, $v_{св} = 6 \div 10$ м/ч. Электроды обладают повышенной чувствительностью к изменению сварочного режима, а также к следам ржавчины и влаги на кромках свариваемых труб. Удлинение дуги, а следовательно, и повышение напряжения на ней (U_d) на 10—15% может вызвать появление пор. Однако металлургический тип покрытия этих электродов и комплексное раскисление металла шва

соответствующие типу Э42-0

Таблица 9

Механические свойства металла шва и сварного соединения							
σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_s , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C			
				+20	-20	-40	-60
44—52	35—42	20—22	60—70	11,0—16,0	9,0—13,0	7,0—10,0	4,0—6,0
44—50	33—40	28—35	60—70	12,0—17,0	9,5—12,0	8,0—9,0	7,0—6,0
42—49	34—40	23—30	60—70	12,0—16,0	9,0—10,0	7,0—10,0	4,0—7,0
43—52	35—42	24—30	60—70	12,0—16,0	8,0—11,0	7,0—9,0	4,0—6,0
44	35	20	60	8,0	5,5	—	—
48—54	40—45	26—30	—	9,0—12,0	—	—	—

Некоторые электроды,

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %				σ_B , кгс/мм ²
	C	Mn	Si	S, P (каждого не более)	
УОНИ-13/45	0,09—0,11	0,55—0,65	0,20—0,25	0,03	44—46
ВН-48	0,08	0,70	0,40	0,40	44—52
SH Grün K-50	0,06	0,95	0,40	—	48—54
Фох EV-47	0,08	0,70	0,40	—	48—50

* В знаменателе приводятся значения по Шарпи.

позволяют получить сварное соединение, обладающее высокими вязкопластическими свойствами. Металл шва содержит весьма мало газовых и неметаллических включений. Сварное соединение, выполненное этими электродами, обладает высокой эксплуатационной надежностью.

Для сварки корневого слоя шва стыков труб из низколегированных трубных сталей с $\sigma_B < 55$ кгс/мм² применяют электроды типов Э42-О и Э42А-Ф, а для сварки заполняющих слоев — типов Э50-О и Э50А-Ф. Так же как и в предыдущем случае, сварка корневого слоя шва целлюлозными электродами разрешается при подземной прокладке трубопроводов и температуре сварки не ниже -40 °С. При надземной и подземной прокладке трубопроводов в северной климатической зоне и температуре сварки ниже -40 °С для сварки корневого слоя шва применяются электроды фтористокальциевого типа Э50А-Ф (табл. 11).

Для сварки заполняющих слоев шва при подземной прокладке трубопровода и температуре сварки не ниже -40 °С применяются электроды типа Э50-О (табл. 12), которые от электродов, приведенных в табл. 9, отличаются только повышенными прочностными характеристиками. По остальным показателям они практически аналогичны этим электродам, хотя композиция их покрытия, как правило, учитывает особенности сварки заполняющих слоев шва.

Для надземной (и подземной) прокладки северных трубопроводов при сварке корневого и заполняющих слоев шва применяются электроды фтористокальциевого типа Э50А-Ф. Для сварки как корневого, так и заполняющих слоев шва при надземной прокладке трубопроводов разрешается применять только электроды, обладающие стабильными сварочно-технологическими свойствами,

Соответствующие типу Э42А-Ф

Механические свойства металла шва и сварного соединения						
σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	α_H , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °С			
			+20	-20	-40	-60
30—36	24—28	60—65	$\frac{18,0-22,0}{16,0-18,0^*}$	$\frac{10,0-11,5}{8,0-10,6}$	$\frac{7,0-9,0}{4,0-6,0}$	5,5—6,9
32—40	22—32	—	16,0—26,0	—	—	—
42—48	26—32	—	$\frac{23,1}{22,0}$	$\frac{22,6}{19,4}$	$\frac{17,2}{15,9}$	9,8
35—43	27—35	70—80	$\frac{20,0-25,0}{18,0-23,0}$	$\frac{22,0}{22,0}$	$\frac{17,0}{15,0}$	—

устойчивым горением дуги, легкостью ее зажигания, маневренностью, стойкостью против образования пор. В СССР для этих целей в основном рекомендуются три марки электродов: УОНИ-13/55; Garant; Фох EV-50. Эти электроды от приведенных в табл. 10 отличаются только механическими характеристиками, а по технике сварки, $v_{св}$ и металлургическому типу аналогичны им.

Увеличивающийся объем строительства трубопроводов, сооружаемых из сталей повышенной прочности с $\sigma_B \geq 55$ кгс/мм², легированных микродобавками V, Nb и Ti, которые без дополнительных мероприятий можно варить только электродами фтористокальциевого типа, потребовал разработки электродов, обеспечивающих производительность сварки на уровне целлюлозных, а качество металла шва — на уровне фтористокальциевых. В табл. 13 представлены подобные электроды, предназначенные для сварки заполняющих слоев шва стыков труб из сталей дисперсионного упрочнения. Эти электроды, позволяя довести $v_{св}$ до 24—26 м/ч, обеспечивают высокие вязкопластические свойства металла шва. Поэтому их применение для сварки неповоротных стыков труб весьма перспективно.

При сварке трубопроводов в средних и южных климатических зонах страны и подземной прокладке, а также в случае использования технологии, предусматривающей обязательный предварительный подогрев, для корневого слоя шва рекомендуется применять целлюлозные электроды марки ВСЦ-4А типа Э50-О. При сварке в сложных климатических условиях для выполнения корня шва возможно применение только фтористокальциевых электродов типа Э50А-Ф.

Некоторые электроды, соответствующие типу Э50А-Ф

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %				Механические свойства металла шва и сварного соединения							
	C	Mn	Si	S, P (каждого по отдельности)	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ² , при T исп, °C			
									+20	-20	-40	-60
УОНИ-13/55	0,90—0,11	0,80—0,90	0,35—0,45	0,03	52,0—55,0	40,0—42,0	22,0—26,0	62—65	25,0—27,0 12,0— —20,0*	13,0—15,0 4,5—2,5	10,0—12,0 6,0—9,0	6,0—8,0 3,0—5,0
Garant	0,09—0,11	0,70—0,90	0,35—0,50	0,03	50,0—54,0	40,0—41,0	24,0—30,0	65—70	18,0—22,0 13,0—19,0	13,0—15,0 4,5—8,0	10,0—13,0 5,0—8,5	7,0—10,0 7,0—10,0
EVB-50	0,08—0,10	0,70—0,90	0,35—0,50	0,03	51,0—54,0	40,0—42,0	22,0—28,0	65—70	20,0—26,0	13,0—15,0	10,0—12,0	6,0—8,9
Fox EV-50	0,08—0,12	0,90—1,20	0,35—0,60	0,03	50,0—55,0	43,0—45,0	28,0—30,0	60—70	18,0—21,0 18,0—19,0	14,0—18,0 12,0—19,0	12,0—14,0 6,0—8,0	6,0—8,0 2,5—4,5
OK Tensitrod	0,08	1,50	0,60	—	54,0	46,0	28,0	70	—	7,8**	—	—
Tensilend-70	0,08	1,50	0,60	—	56,0	48,0	26,0	60	—	8,0**	—	—
Ductilend-70	—	—	—	—	54,0	47,0	30,0	70	—	—	—	—
Philips-36	—	—	—	—	52,0—37,0	43,0—48,0	26,0—30,0	—	16,0—20,0	10	—	—
Нителчу-16	0,07	0,90	0,61	—	58,8	48,7	32,2	—	12,2***	—	—	7,1****

* В знаменателе приводятся значения по Шарпи.

** T исп = -30 °C.

*** Поглощенная энергия удара A_ц, кгс·м; T исп = 0 °C.**** A_ц, кгс·м.

Таблица 12

Некоторые электроды, соответствующие типу Э50-0

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %				Механические свойства металла шва и сварного соединения							
	C	Mn	Si	Mo	S, P (каждого по более)	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ² , при T исп, °C		
										+20	-20	-40
ВСП-4А	0,08—0,14	0,50—0,60	0,10—0,20	—	0,04	51—60	40—48	18—28	60—70	10,0—16,0	8,0—14,0	7,0—8,0
Fox Cel Mo	0,06	0,40	0,10	0,50	—	53—60	43—50	22—28	60—70	11,0—15,0	—	—
Phoenix Cel 70	0,09	0,50	0,20	0,13	—	50—56	45—48	25—28	—	11,0—14,0	—	—
CitoFlex-55	0,10	0,40—0,50	0,10—0,20	0,40—0,50	0,03	50—58	40—45	20—26	60—70	10,0—16,0	9,0—13,0	6,0—9,0
Shield Arc 85	0,10	0,40—0,50	0,10—0,20	0,40—0,50	0,03	50—58	40—45	20—26	60—70	10,0—16,0	8,0—13,0	6,0—9,0

Таблица 13

Некоторые новые электроды с фтористокальциевым покрытием, предназначенные для сварки магистральных трубопроводов способом сверху—вниз

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %				Механические свойства металла шва и сварного соединения							
	C	Mn	Si	S, P (каждого по более)	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ² , при T исп, °C			
									+20	-20	-40	-60
ВСФС-50	0,10	1,0—0,3	0,30—0,50	0,030	55	—	20	—	22,0	18,0	12,0	8,0
LH	0,10	—	—	0,025	51	42	34	67	—	12,0*	10,0**	—
Perfect	0,08	0,8	0,25	0,030	52	43	26	65	—	18,0	—	—
Novocitobasic	0,10	0,9—1,1	0,50	0,025	52	45	26	—	—	18,0	12,0	—

* T исп = -30 °C.

** T исп = -50 °C.

Для сварки заполняющих слоев шва (за исключением северных трубопроводов) можно применять целлюлозные электроды (табл. 14), в том числе диаметром 5,0—6,5 мм.

Таблица 14

Некоторые электроды, соответствующие типу Э60-0 и Э70-0

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %					
	C	Mo	Si	Mo	Ni	S, P (каждого не более)
Phoenix Cel 80	0,16	1,00	0,20	—	0,15	—
Shield Arc 90B	0,12	0,40	—	0,80	—	0,02
Fox Cel 85	0,15	0,90	0,15	—	0,20	—
Fox Cel 90	0,14	0,80	0,15	0,20	0,30	—
Нитецу-НІСО-600	0,06	0,48	0,28	0,41	—	—

Продолжение табл. 14

Марка электрода	Механические свойства металла шва и сварного соединения					
	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	ψ , %	A_H , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C	
					+20	-40
Phoenix Cel 80	60,0	52,0	22,0	—	14,0	—
Shield Arc 90B	61,0	56,0	24,0	50	10,0—15,0	—
Fox Cel 85	—	46,0	20,0	60—70	$\geq 8,0$	—
Fox Cel 90	60,0	50,0	18,0	60—70	$\geq 10,0$	—
Нитецу-НІСО-600	61,4	53,0	25,1	—	9,4*	7,6**

* A_H , кгс·м; $T_{исп} = 0$ °C.

** A_H , кгс·м; $T_{исп} = -60$ °C.

В СССР для сварки выполняющих слоев шва рекомендуется применять в основном фтористокальциевые электроды, ограничивая область их применения также по маркам в зависимости от условий прокладки. Кроме того, в этой группе электродов имеются марки с небольшими разбросами по σ_B металла шва, с тем чтобы иметь возможность более точно обеспечивать равнопрочность сварных соединений с учетом конкретных свойств труб различных марок (табл. 15). В этих электродах для обеспечения равнопрочности сварного соединения используются специальные легирующие элементы.

Таблица 15

Некоторые электроды, соответствующие типу Э60-Ф и Э70-Ф

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, %					
	C	Mn	Si	Mo	Ni	S, P (каждого не более)
BCФ-65	0,08—0,10	1,4—1,6	0,25—0,35	0,4—0,5	0,1—0,2*	0,03
Schwarz-3K	0,08—0,11	1,0—1,2	0,20—0,30	0,35—0,45	—	0,03
SH Kupfer	0,06	0,90	0,30	0,50	0,95	0,03
Fox EV-63	0,08	1,8	0,7	—	—	—
Nibaz-65	0,1	0,7—1,4	0,3—0,5	—	0,5—1,0	0,04
BCФ-60	0,09—0,12	1,0—1,3	0,3—0,5	0,25—0,35	—	0,03
BCФ-75	0,08—0,10	1,4—1,7	0,3—0,35	5—0,6	0,2—0,3*	0,03
Fox EV-70 Mo	0,08	1,7	0,6	0,5	0,1*	—
L-62	0,08	1,10	0,65	0,25	0,87	0,02
L-70	0,08	1,42	0,50	0,26	1,65	0,02
Нитецу L-60	0,07	0,98	0,42	0,22	0,64	—
Нитецу L-60S	0,05	1,12	0,46	0,20	1,51	—
Нитецу N-12	0,05	0,65	0,46	—	2,46	—

* V.

Механические свойства металла шва и сварного соединения

Марка электродов	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	ψ , %	a_n , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C			
					+20	-20	-40	
					-60			
BCФ-65	65,0—70,0	50,0—56,0	22,0—28,0	65—70	$\frac{16,0-20,0}{14,0-18,0^*}$	$\frac{13,0-15,0}{5,0-7,0}$	$\frac{8,0-10,0}{8,0-10,0}$	$\frac{6,0-8,0}{6,0-8,0}$
Schwarz-3K	63,0—69,0	53,0—55,0	22,0—23,0	65—69	$\frac{16,0-18,0}{14,0-17,0}$	$\frac{12,0-13,0}{4,8-8,5}$	$\frac{8,0-16,0}{2,5-6,5}$	$\frac{6,0-7,0}{6,0-7,0}$
SH Kupfer	62,0—68,0	52,0—57,0	22,0—28,0	—	$\frac{13,0-18,0}{15,0-22,0}$	—	—	—
Fox EV-63	60,0—70,0	50,0—55,0	23,0—28,0	60—70	$\frac{15,0-20,0}{15,0-20,0}$	$\frac{4,5,0}{15,0}$	$\frac{14,0}{12,0}$	$\frac{13,0}{7,0}$
Nibaz-65	60,0—70,0	50,0—28,0	23,0—28,0	65—70	$\frac{16,0-20,0}{16,0-18,0}$	13,0	8,0	7,0
BCФ-60	57,0—62,0	48,0—50,0	28,0—30,0	65—70	$\frac{16,0-18,0}{14,0-17,0}$	$\frac{12,0-13,0}{4,8-8,5}$	$\frac{8,0-10,0}{2,5-6,5}$	$\frac{6,0-7,0}{6,0-8,0}$
BCФ-75	75,0—80,0	60,0—65,0	18,0—22,0	60—65	$\frac{11,0-14,0}{8,0-10,0}$	$\frac{8,0-10,0}{5,0-8,0}$	$\frac{8,0-10,0}{8,0-10,0}$	$\frac{6,0-8,0}{6,0-8,0}$
Fox EV-70 Mo	72,0—76,0	63,0—67,0	18,0—23,0	55—65	$\frac{15,0-16,0}{15,0-18,0}$	—	—	—
L-62	66,0	54,0	30,0	—	19,0	—	—	8,5***
L-70	78,0	69,0	26,0	—	17,0	—	—	10,2***
Нителу L-60	64,5	55,3	29,0	—	23/4**	—	—	13,2***
Нителу L-60S	66,1	58,5	29,8	—	24,4**	—	—	—
Нителу N-12	60,5	52,5	30,5	—	26,1**	—	—	—

* В знаменателе приводятся значения по Шарпи.

** A_n , кгс·м; $T_{исп}$ = 0 °C.*** A_n , кгс·м.

Проволоки и флюсы для автоматической сварки

Автоматическая сварка под флюсом является в настоящее время основным методом сварки поворотных стыков труб. Настоящий раздел посвящен свойствам и характеристикам ряда промышленных марок сварочных флюсов и проволок, перспективных и применяемых в отечественном и зарубежном трубопроводном строительстве.

Выбор сварочных материалов для конкретных условий автоматической сварки под флюсом существенно облегчается стандартизацией и унификацией требований к сочетанию флюс — проволока, которые в последние годы разработаны в ряде стран. Например, в США принято обозначение флюсов, которое характеризует: прочностные характеристики, требования по σ_B , A_n , марку рекомендуемой проволоки. Например: F 60-N14 или F 71-EM12K. Здесь F обозначает тип сварочного материала — флюс, первая цифра указывает требования по σ_B шва, следующая цифра характеризует минимально требуемую поглощенную энергию A_n (табл. 16). Затем следует марка применяемой сварочной проволоки (например N14, EM12K).

Таблица 16

Маркировка флюсов по стандарту США

Маркировка флюсов	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	σ_s , %	A_n (по Шарпи), кгс·м
F60 F61 F62	42	32	25	Требования не предъявляются 3 при —18 °C 3 при —29 °C
F70 F71 F72	49	35	22	Требования не предъявляются 3 при —18 °C 3 при —29 °C

По-видимому, аналогичным образом можно продолжить классификацию и для более высоких уровней по σ_B . Международной организацией по стандартизации была предложена более детальная система обозначений, которая отмечает тип флюса (F — плавный, B — спеченый, A — агломерированный), прочностную характеристику (0 — требования не предъявляются; 1 — 41 ÷ 51 кгс/мм²; 2 — 44 ÷ 54; 3 — 48 ÷ 58; 4 — 52 ÷ 62; 5 — 56 ÷ 66; 6 — 60 ÷ 70), требования по A_n в соответствии с требованиями к температуре испытаний, при которой средняя A_n по 3 образцам составляет 5 кгс·м (по Шарпи) при минимально допустимой 3,5 кгс·м: не предъявляются (1); +20 °C (2); 0 °C (3); —20 °C (4); —40 °C (5). В обозначение также входят вид и род сварочного тока (a — переменный или постоянный ток любой полярности; b —

только постоянный ток любой полярности; с — только обратная полярность), требования к U_{xx} (x — не предъявляются, обычно ниже 65 в; y — выше 65 в; z — выше 80 в) и тип сварочной проволоки в соответствии с табл. 17.

Например, F11ayPS2 и B63bxPS3Mo. Здесь F и B обозначают плавный и керамический флюс соответственно, первая цифра (1 и 6) характеризует требования по σ_B , вторая (1 и 3) — по a_n ; а и b — требования по $I_{св}$; у и x — по U_{xx} ; PS2 и PS3Mo — типы проволоки.

В СССР действует ГОСТ 2246—70 на стальную сварочную проволоку (табл. 18), согласно которому 77 марок проволок разделены на 3 группы: низкоуглеродистые (6 марок), легированные (26 марок) и высоколегированные (40 марок). В условном обозначении проволоки по данному стандарту указываются: диаметр проволоки, ее марка, обязательно начинающаяся с букв Св (сварочная), индекс наличия омедненного слоя (О), номер ГОСТ. Например, проволока ЗСв-08ХМ-О ГОСТ 2246—70 означает: проволока сварочная диаметром 3 мм марки 08ХМ с омедненной поверхностью.

Применяемые в трубопроводном строительстве марки флюсов можно подразделить по способу изготовления (плавленные, керамические или агломерированные), по минералогической структуре (силикаты, алюмосиликаты, титаносиликаты, карбонаты), по основности шлаков (кислые, нейтральные и основные), по окисному составу (высоко-, средне-, низкомарганцовистые; высоко-, средне-, низокремнистые).

Плавленные флюсы отличаются достаточной химической и гранулометрической однородностью, требуемой механической прочностью частиц. Благодаря преимущественной шлаковой защите процесс сварки протекает спокойно, без выбросов дыма и газов. Эти флюсы весьма эффективны в технико-экономическом отношении. Плавленные флюсы пригодны к многократному использованию, что имеет большое значение для сварки в трубопроводном строительстве. Однако главным достоинством плавленных флюсов являются их высокие сварочно-технологические свойства, которые обусловлены прежде всего тем, что в процессе их выплавки исходные компоненты дегасируются и диссоциируют. Тем не менее, с позиции металлургической обработки сварочной ванны плавные флюсы имеют весьма ограниченные возможности по сравнению с керамическими. Плавные флюсы не могут содержать легирующих элементов, модификаторов и раскислителей в непрореагированном состоянии, поскольку они окисляются уже при выплавке флюса.

Например, при сварке под плавными флюсами условия раскисления и легирования (кроме Mn и Si) полностью определяются химическим составом сварочной проволоки, а осуществление модифицирования структуры практически невозможно. Кроме того, основность промышленных плавных флюсов обычно не превышает 2,

Таблица 17

Типы проволоки по международному стандарту и их химический состав, %

Тип	C	Si		Mn	Mo	P	S	Ni
		не более	не более					
PS1	0,06—0,12	0,10	0,40—0,60	—	—	—	—	—
PS2	0,08—0,18	0,05—0,15	0,80—1,20	—	—	—	—	—
PS3	0,08—0,15	0,05—0,25	1,30—1,70	—	—	—	—	—
PS4	0,08—0,18	0,05—0,25	1,80—2,20	—	—	—	—	—
PS6	0,08—1,17	0,20—0,30	2,80—3,20	—	—	—	—	—
PS1Si	0,08—0,15	0,10—0,40	0,40—0,60	—	—	—	—	—
PS2Si	0,08—0,15	0,15—0,40	0,80—1,20	—	—	—	—	—
PS2Mo	0,08—0,15	0,05—0,25	0,80—1,20	0,45—0,60	—	—	—	—
PS3Mo	0,08—0,15	0,05—0,25	1,30—1,70	0,45—0,60	—	—	—	—
PS4Mo	0,08—0,16	0,05—0,75	1,80—2,20	0,45—0,60	—	—	—	—
PS6Mo	0,08—0,17	0,15—0,30	2,80—3,20	0,45—0,60	—	—	—	—
PS2Ni	0,06—0,12	0,05—0,15	0,80—1,20	—	—	—	—	—
PS3NiMo	0,08—0,12	0,05—0,25	1,30—1,70	0,45—0,60	—	—	—	—

Таблица 18

Химический состав некоторых марок проволок, выпускаемых в СССР (Св) и ЧССР (А), %

Марка проволоки	C		Si		Mn	Cr	Ni		Mo	S	P
	не более	не более	не более	не более							
Св-08	0,10	0,03	0,35—0,60	0,15	0,30	—	—	—	—	—	—
Св-08А	0,10	0,03	0,35—0,60	0,12	0,25	—	—	—	—	—	—
Св-08АА	0,10	0,03	0,35—0,60	0,10	0,25	—	—	—	—	—	—
Св-08ГА	0,10	0,03	0,80—1,40	0,10	0,25	—	—	—	—	—	—
Св-10ГА	0,12	0,03	1,10—1,40	0,20	0,30	—	—	—	—	—	—
Св-08Г2С	0,14	0,70—0,95	1,80—2,40	0,20	0,25	—	—	—	—	—	—
Св-08МХ	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,45—0,65	0,30	—	—	—	—	—	—
Св-08ХМ	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	0,30	—	—	—	—	—	—
А0	0,05—0,10	0,10	0,35—0,65	—	—	—	—	—	—	—	—
А1	—	0,10	1,15—1,35	—	—	—	—	—	—	—	—
А2	—	0,10	1,25—1,55	—	—	—	—	—	—	—	—
А3	—	0,25	1,40—1,70	—	—	—	—	—	—	—	—

что не в состоянии гарантировать торможение кремневосстановительных процессов, часто ухудшающих вязкопластические свойства металла шва.

Керамические (агломерированные) флюсы в большинстве случаев обеспечивают основные шлаки и построены на карбонатной основе CaCO_3 , MgCO_3 , иногда MnCO_3 (например, японские флюсы марок FF-56, FF-59, FF-60). Благодаря комбинированной газошлаковой защите сварочной ванны эти флюсы весьма эффективно защищают расплав от окружающего воздуха, а сравнительно низкие температуры их термообработки позволяют вводить в состав любые раскисляющие или легирующие металлические добавки. Поэтому при сварке под керамическими флюсами условия раскисления, легирования и модифицирования во многом определяются химическим составом самого флюса. При этом могут быть использованы кипящие нелегированные проволоки типа Св-08. Однако за рубежом (аналогично сварке в CO_2) для керамических флюсов иногда рекомендуются перераскисленные кремнемарганцовистые сварочные проволоки. Основное преимущество сварки под высокоосновными керамическими флюсами — обеспечение высоких вязкопластических характеристик металла шва, в особенности при отрицательных температурах. Однако эти флюсы имеют целый ряд недостатков: бурное протекание реакций в сварочной ванне с интенсивным выделением газообразных продуктов этих реакций, что ухудшает стабильность режима сварки; недостаточная механическая прочность частиц флюса и повышенная доля пылевидной фракции; высокая гигроскопичность керамических флюсов, изготовленных на жидком стекле (теоретически такой флюс с сухим остатком жидкого стекла 6,9% может увлажниться таким образом, что на 100 г флюса придется до 84 г воды [15]).

При разработке керамических флюсов наметились следующие основные тенденции: замена жидкого стекла алюминатом натрия для получения бессиликатных флюсов и снижения гигроскопичности готовых флюсов (например, разработанный во ВНИИСТ флюс ВСКФ-60); замена карбонатов их окислами для стабилизации сварочного режима и разработка карбонатных высокоосновных флюсов с преимущественно шлаковой защитой сварочной ванны; введение в состав флюсов ZrO_2 , в частности, для улучшения отделимости шлаковой корки при сварке в разделку (флюс VUZ-42Mn). В большинстве случаев производство керамических флюсов экономически менее выгодно, чем плавящихся.

В настоящее время используются главным образом плавящиеся флюсы. Наиболее широкий ассортимент плавящихся флюсов характерен для СССР и социалистических стран (ЧССР, ПНР). Однако в некоторых странах Западной Европы и Америки керамические флюсы составляют довольно большую часть производства, например в ФРГ и Швеции около 30%. Фирма «Эрликон» (Швейцария) предлагает покупателям три плавящихся флюса и пять основных керамических флюсов; «ЭСАБ» (Швеция) — соответственно четыре

и пять; «Смитвелд» (Голландия) — шесть и пять, а «Судометал» (Бельгия) — вообще только керамические.

Дифференциация флюсов по многочисленным формулам расчета основности носит лишь сравнительный характер, поскольку одни и те же флюсы в одних формулах трактуются как основные, а в других как кислые. Аналогия при определении основности шлаков с металлургическими процессами также не всегда правомерна: в металлургии окислы MnO и FeO считаются слабоосновными, а при сварке под флюсами эти окислы наиболее активны. Наоборот, такие окислы, как Al_2O_3 и TiO_2 , независимо от степени их основности, несравненно менее металлургически активны при сварке, чем двуокись кремния SiO_2 [5]. Поэтому для практических целей рационально классифицировать флюсы на кислые, нейтральные и основные по относительному содержанию в их составе шлакообразующих компонентов: флюсы, содержащие более 40% SiO_2 и 40% MnO , целесообразно относить к кислым; содержащие не более 30% SiO_2 и не менее 50% $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ — к нейтральным и флюсы, содержащие менее 20% SiO_2 и не менее 70% $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ — к основным.

Кислые флюсы, как правило, наиболее широко используются при сварке в отечественном трубопроводном строительстве в тех случаях, когда к механическим характеристикам металла шва не предъявляется особо высоких требований. Эти флюсы сравнительно

Таблица 19

Выбор системы раскисления проволоки в зависимости от металлургического типа флюса

Тип флюса	Тип проволоки
Высокомарганцовистый высококремнистый	Малоуглеродистая нелегированная кипящая (< 1% Mn)
Среднемарганцовистый высококремнистый	Малоуглеродистая марганцовистая кипящая (1% Mn)
Маломарганцовистый и безмарганцовистый высококремнистый	Малоуглеродистая высокомарганцовистая кипящая (1,5—2,0% Mn)
Высокомарганцовистый низкокремнистый	Малоуглеродистая нелегированная полуспокойная (0,15—0,25 Si)
Среднемарганцовистый низкокремнистый	Малоуглеродистая марганцовистая спокойная (1% Mn; 0,2—0,5% Si)
Маломарганцовистый и безмарганцовистый низкокремнистый	Малоуглеродистая высокомарганцовистая спокойная (1,5—2,0% Mn; 0,2—0,5% Si)
Высокоосновной карбонатный без раскислителей	Малоуглеродистая кремнемарганцовистая (2,0 Mn; 0,8% Si)
Высокоосновной карбонатный с раскислителями	Малоуглеродистая нелегированная кипящая (< 1% Mn)
Высокоосновной некарбонатный бессиликатный	Малоуглеродистая марганцовистая спокойная (1,5% Mn; 0,4—0,6% Si)

Химический состав не

Тип флюса	Марка флюса	SiO ₂	TiO ₂	CaO	MgO
Высокомарганцовистые высокремнистые	VUZ-34 Mn	41,0—44,0	—	9,0—7,0	3,0—6,0
	VUZ-152	47,0—53,0	—	8,0—12,0	—
	AH-348	41,0—44,0	—	6,5	5,0—7,5
	AH-10	42,5—45,5	—	8,0—11,0	0,5—3,0
	BB-3	34,1	—	8,5	29,2
Высокремнистые низ- комарганцовистые	NO 90	34,0	—	14,0	2,9
	NO 220	20,0	12,0	6,0	—
Среднемарганцовистые среднекремнистые	VUZ-2BaF	20,0—26,0	—	4,0—8,0	2,0
	Grau H	15,0	8,0	12,0	6,0
	Grau L	25,0	5,0	—	8,0
	AH-22	18,0—21,5	—	12,0—15,0	11,5—15,0
Средне- и низкремни- стые низкомарганцо- вистые	VUZ-4BaF	8,0—15,0	—	7,0—12,0	2,5
	OP40TT	14,3	—	8,5	29,2
	OP140TT	14,3	—	8,5	29,2

Примечание. Тип флюса по способу изготовления приводится в приложении.

Таблица 20

которых флюсов, %

MnO	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	Na ₂ O+ K ₂ O	Al ₂ O ₃	P	S
						не более	
33,5—37,5	2,0—3,5	2,0	—	0,5	4,0—7,0	0,10	0,10
22,0—28,0	—	3,0	—	—	5,0	—	—
34,0—38,0	4,0—5,5	2,0	—	—	4,5	0,12	0,15
36,0—41,0	—	1,5	—	—	5,0	0,15	0,15
—	27,5	—	—	2,5	11,2	—	—
25,0	3,0	2,0	—	—	20,0	—	—
12,0	4,0	—	6,0	—	40,0	—	—
16,0—20,0	20,0—25,0	2,0	—	—	23,0—27,0	0,08	0,08
23,0	11,0	—	—	—	24,0	—	—
15,0	—	—	—	—	21,0	—	—
6,0—9,0	20,0—24,0	0,6	1,0	19,0—23,0	19,0—23,0	0,06	0,06
4,0—7,0	25,0—31,0	1,0	—	0,5—2,5	39,0—47,0	0,06	0,06
—	27,5	—	—	2,5	15,8	—	—
2,6	27,5	—	—	2,5	15,8	—	—

Механические свойства металла шва для

σ _В трубы, кгс/мм ²	Марка флюса	Марка проволоки	σ _В , кгс/мм ²	σ _Т , кгс/мм ²
≤ 50	VUZ-1H VUZ-34Mn VUZ-42Mn	AO	48,0	34,0
< 55	UV-420	S1	46,0—50,0	36,0—40,0
	VUZ-1H	S2	50,0—54,0	41,0—45,0
	VUZ-34Mn VUZ-42Mn	A2	52,0	36,0
	Grau Z	S2Mo	53,0	42,0
≥ 55	H-100	S2Mo	54,0	42,0
	AH-348A	Св-08ГА	54,2—56,4	—
	OP40TT	S2Mo	56,0	46,0
	OP40TT	S3Mo	58,0	48,0
	Grau H	S2Mo	56,0	45,0
	Grau L	S3Mo	59,0	48,0
	OP140TT	S2Mo	68,0	58,0
	AH-22	Св-08ХМ	67,6—72,0	—
TAST-4	Sp-16Al	60,0—63,5	—	

Таблица 21

некоторых сочетаний флюс—проволока

δ _s , %	ψ, %	σ _H , кгс·м/см ² , при T _{исп} , °C			
		+20	-20	-40	-60
30,0	65,0	13,5	—	—	—
29,0—33,0	—	13,0—16,0	11,0—14,0	9,0—12,0	—
28,0—32,0	—	13,0—16,0	9,0—12,0	7,0—10,0	—
28,0	62,0	15,0	—	—	—
—	—	12,0	—	—	—
30,0	64,0	—	—	—	—
20,6—22,7	52,0	6,5—7,8	4,1—5,7	1,5—2,5	—
22,0	—	18,0	—	—	—
19,0	—	11,0	—	—	—
25,0	—	21,0	—	—	—
24,0	—	20,0	—	—	—
22,0	—	12,5	12,5	8,4	—
18,3—20,6	55,0	12,5—16,6	10,5—12,1	7,8—8,4	3,5—6,5
—	—	—	—	8,1—8,8	—

Таблица 22

Некоторые сочетания флюс — проволока для сварки стыков труб из малоуглеродистых легированных сталей с $\sigma_B \leq 50$ кгс/мм²

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы			Характеристика сочетания флюс— проволока			
		T _{исп} , °C	a _H ср (по 3 образцам), кгс·м/см ²	a _H min (единичное значение), кгс·м/см ²	Марка флюса	Марка проволоки	a _H min, кгс·м/см ² , при T _{исп} , °C	
							0	-20
А	Северное исполнение, подземная прокладка	-20	≥ 7	≥ 5	АН-22	Св-08ГА	—	7,0
					Grau H	S1	—	8,0
					Grau L	S1	—	9,0
					OP40TT	S1	—	10,0
Б	Обычное исполнение, подземная прокладка	0	≥ 7	≥ 5	Все сочетания группы А			
					KBC-19	Св-08	8,0	—
					АН-348А	Св-08	7,0	—
					АН-60	Св-08	7,0	—
					VUZ-34 Mn	А0	7,0	—
					PiE 18UP	K8 Mn2	7,0	—

мало гигроскопичны, обеспечивают хорошую отделимость шлака, гладкую поверхность швов.

Указанные характеристики ухудшаются с повышением основности флюса. Когда содержание СаО во флюсе становится ≥ 10%, а SiO₂ > 20%, может произойти гидратация флюса при его увлажнении с образованием Са (ОН)₂. В этих условиях влага из флюса частично может быть удалена только при нагреве на 450 °C (со строгим соблюдением режима), что необходимо принимать во внимание, в частности при подготовке к сварке под флюсом АН-22. Введение в состав нейтральных и основных флюсов более 30% Al₂O₃ снижает их склонность к образованию высокотемпературных продуктов гидратации.

Для флюса АН-22 за оптимальную может быть принята прокатка при 470—500 °C в течение 2 ч. При таких условиях обеспечивается влажность флюса не более 0,02%, а содержание диффузионного водорода (H_{диф}) в наплавленном металле до 4 см³/100г. Однако в ряде случаев даже длительная прокатка при высокой температуре флюса АН-22 не гарантирует отсутствия пор в металле шва.

Как нейтральные, так и основные плавленые флюсы практически в равной степени повышают вязкопластические свойства металла шва по сравнению с кислыми флюсами. При сварке под этими флюсами снижается активность кремневосстановительного процесса, уменьшается содержание O₂ и Si в металле шва, повышается a_H (особенно при низких температурах). Если отношение

Некоторые сочетания флюс — проволока для сварки стыков труб из

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы		
		T _{исп} , °C	a _H ср (по 3 образцам), кгс·м/см ²	a _H min (единичное значение), кгс·м/см ²
А	Северное исполнение, надземная прокладка	-60	≥ 5,0	≥ 3,5
		-40	≥ 7,0	≥ 5,0
Б	Северное исполнение, подземная прокладка	-40	≥ 5,0	≥ 3,5
		-20	≥ 7,0	≥ 5,0
В	Обычное исполнение, подземная прокладка	-20	≥ 5,0	≥ 3,5
		0	≥ 7,0	≥ 5,0

Таблица 23

малоуглеродистых низколегированных сталей с $\sigma_B < 55$ кгс/мм²

Характеристика сочетания флюс— проволока					
Марка флюса	Марка проволоки	a _H min, кгс·м/см ² , при T _{исп} , °C			
		0	-20	-40	-60
АН-17М Grau H OP40TT	Св-08ГМ S2 Mo S2 Mo	—	—	9,0	6,0
		—	—	11,0	8,0
		—	—	9,0	7,0
Все сочетания группы А					
Grau L	S2 Mo	9,0	9,0	7,0	—
Все сочетания групп А и Б					
KBC-19 АН-348 А АН-60 Н-100 VUZ-34 Mn PiE 18UP	Св-08ГА Св-08ГА Св-08ГА Е-16 А1; А2 10 Mn 4	9,0	7,0	—	—
		7,0	5,0	—	—
		8,0	6,0	—	—
		7,0	5,0	—	—
		7,0	5,0	—	—
		7,0	5,0	—	—

Некоторые сочетания флюс—проволока для сварки стыков трубопрово

Группа	Условия прокладки	Характеристика свариваемой трубы		
		$T_{исп}$, °C	α_n ср (по 3 образцам), кгс·м/см ²	α_n min (единичное значение), кгс·м/см ²
А	Северное исполнение, наземная прокладка	—60	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$
		—40	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$
Б	Северное исполнение, подземная прокладка	—40	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$
		—20	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$
В	Обычное исполнение, подземная прокладка	—20	$\geq 5,0$	$\geq 3,5$
		0	$\geq 7,0$	$\geq 5,0$

* В ГОСТ 2246—70 отсутствует.

$Mn/S = 3 \div 4$, то содержание O_2 в металле шва практически одинаково при сварке как под нейтральными, так и под основными флюсами [5].

Нейтральные флюсы, как правило, менее «водородистые», чем основные, т. е. ближе, чем последние, к фтористокальциевым электродам. Известно, например, что высокоосновные флюсы системы $CaO-MgO-Al_2O_3-CaF_2$ обеспечивают более низкое значение α_n , чем нейтральные флюсы [5]. Высокоосновные флюсы являются, как правило, керамическими и могут рекомендоваться в некоторых специальных случаях для сварки тех же труб, что и обычные основные, но особенно в условиях наземной прокладки на Севере.

Сочетание различных типов флюсов и проволок в целях наглядности представлено в табл. 19.

Химический состав некоторых отечественных и зарубежных флюсов, пригодных для сварки в трубопроводном строительстве, приведен в табл. 20; механические свойства металла шва при сочетаниях некоторых отечественных и зарубежных флюсов и проволок в случае автоматической сварки стыков труб под флюсом — в табл. 21, а выбор сочетаний флюс—проволока для многослойной автоматической сварки заполняющих слоев шва поворотных стыков труб из сталей с различными σ_B — в табл. 22—24.

дов из малоуглеродистых низколегированных сталей с $\sigma_B \geq 55$ кгс/мм²

Характеристика сочетания флюс—проволока					
Марка флюса	Марка проволоки	α_n min, кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °C			
		0	—20	—40	—60
АН-22 АН-43	Св-08ХМ	—	—	8,0	5,0
	Св-08ГМ*; Св-12М	—	—	8,0	5,0
ВСКФ-60 АНК-30	Св-08А	—	—	7,0	7,0
	Св-08ГА	—	—	7,0	5,0
ОР140ТТ	52Мо	—	—	8,0	6,0
Все сочетания группы А					
Arcosite D-34	T30Mo	—	8,0	4,0	—
OKFlux 10.60	OK Autrod 12.40	—	7,0	4,0	—
Arcosite B-5	T30Mo	—	9,0	6,0	—
Arcosite B-8	T30Mo	—	8,0	5,0	—
Все сочетания групп А и Б					
VUZ-4BaF	S2Mo	10,0	7,0	—	—
АН-22	Св-08ХНФ	9,0	5,0	—	—
Arcosite D-35	T30Mo	7,0	5,0	—	—

Порошковые проволоки, перспективные для сварки в трубопроводном строительстве

Сварка магистральных трубопроводов порошковыми проволоками еще не нашла широкого применения. Однако в связи с необходимостью роста механизации сварки в трубопроводном строительстве применение самозащитных порошковых проволок является весьма перспективным.

Порошковые проволоки, требующие дополнительной газовой защиты (CO_2), наиболее целесообразно применять в стационарных условиях в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к вязкопластическим свойствам металла шва. Применение самозащитной порошковой проволоки позволяет избежать дополнительной защиты сварочной ванны газом или флюсом.

В настоящее время в СССР лишь разрабатывается ГОСТ на порошковые проволоки, поэтому условно порошковые проволоки можно классифицировать по ГОСТ 9466—60 «Электроды металлические для дуговой сварки сталей и наплавки». За рубежом в наибольшей степени известен стандарт США, представленный в табл. 25. Рекомендуется производить сварку на постоянном токе обратной полярности.

По механическим свойствам из всех стандартизованных типов проволок требованиям трубопроводного строительства отвечает

Таблица 25

Сварочные порошковые проволоки по стандарту AWS — А 520—69 (США)

Тип проволоки	Требования к дополнительной защите	Требования к механическим свойствам металла шва и сварного соединения				
		$\sigma_B \text{ min}'$, кгс/мм ²	$\sigma_T \text{ min}'$, кгс/мм ²	$\delta_5 \text{ min}'$, %	α_H (по Шарпи), кгс·м/см ²	
E60T-7	Нет	48	38	22	Не предъявляются	
E60T-8	Нет	43	35	22	2,75 при -18°С	
E70T-1	CO ₂	50	42	22	То же	
E70T-2	CO ₂		Не предъявляются			
E70T-3	Нет					
E70T-4	Нет					
E70T-5	CO ₂ или без защиты		42	22	Не предъявляются 2,75 при -30°С	
E70T-6	Нет		2,75 при -48°С			

Примечание. Проволоки E70T-2 и E70T-3 применяются для сварки однослойных швов, остальные — многослойных.

лишь E70T-6. Несмотря на то что все американские проволоки имеют наполнитель основного типа, требования по α_H для самозащитных проволок весьма «умеренные». Среди этих проволок для целей трубопроводного строительства, по-видимому, пока перспективна лишь проволока марки NR-200 диаметром 1,4 мм, которая предназначена для сварки во всех пространственных положениях при следующих технологических характеристиках: вылет проволоки 25 мм, $I_{св} \leq 150$ а, $U_d = 17 \div 23$ в, толщина одного слоя около 2 мм, производительность наплавки до 3,0 кг/ч. Проволока обеспечивает следующие механические свойства металла шва: $\sigma_B = 63 \div 64$ кгс/мм²; $\sigma_T = 48 \div 54$ кгс/мм²; $\delta_5 = 18 \div 21$ %.

Для многоугловой автоматической сварки труб фирма «Линкольн электрик» разработала самозащитную порошковую проволоку марок: NR-216 диаметром 2,0 мм, предназначенную для сварки корневого слоя, и NR-236 диаметром 2,3 мм, предназначенную для сварки горячего прохода и заполняющих слоев шва.

В СССР выпускаются два типа самозащитных порошковых проволок: с наполнителем рутилосиликатного (ППДСК; ПВС-1; ПВС-1Л; ПВС-3; ППАН-1 и др.) и фтористокальциевого типа (ЭПС-15; ПП2ДСК; ППАН-3; ППАН-7 и др.). В табл. 26 приведены некоторые марки промышленных порошковых проволок, применение которых, по-видимому, перспективно в трубопроводном строительстве.

Порошковые проволоки с наполнителем фтористокальциевого типа позволяют получить наплавленный металл с высокими вязкопластическими свойствами. Однако повышенная чувствительность этих проволок к изменению сварочного режима и необходимость вести сварку на увеличенном вылете (~40—60 мм) несколько ограничивает область применения этих проволок для монтажной сварки трубопроводов. С этой точки зрения более технологичны

Характеристики отечественных

Марка проволоки	Заполнитель	Химический состав наплавленного металла, %				
		C	Mn	Si	Ti	S, P (каждого не более)
ПВС-1	Рутилосиликатный	0,10—0,14	0,40—0,55	0,05—0,10	—	0,04
ПВС-1Л	То же	0,10—0,14	0,40—0,55	0,05—0,10	—	0,04
ПВС-3	»	0,10—0,14	0,50—0,70	0,05—0,10	—	0,04
ЭПС-15	Фтористокальциевый	0,08—0,10	0,80—1,00	0,20—0,80	0,07	0,03
ППАН-3	То же	0,07—0,12	0,70—1,20	0,20—0,40	—	0,03
ППАН-7	»	0,12	0,70—1,30	0,20—0,50	—	0,03

Таблица 26

ных порошковых проволок

Механические свойства металла шва и сварного соединения							
σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	α_H , кгс·м/см ² , при $T_{исп}$, °С			
				+20	-20	-40	
40,0—53,0	38,0—42,0	19,8—24,1	60,0—70,0	10,0—14,0	8,0—11,0	6,0—8,0	
47,0—52,0	34,0—40,0	19,0—23,0	60,0—70,0	10,0—14,0	8,0—10,0	6,0—8,0	
51,0—55,0	40,0—45,0	18,0—24,0	60,0—70,0	10,0—14,0	8,5—11,5	7,0—10,0	
51,0—57,0	46,0—49,0	20,0—26,0	65,0—75,0	14,0—18,0	11,5—14,5	8,0—10,0	
50,0—56,0	—	20,0—28,0	—	13,0—14,0	—	4,0—10,0	
50,0	—	20,0	—	13,0	—	—	

Основные сварочно-технологические характеристики газовых смесей

Состав смеси	Градиент напряжения	Стабильность горения дуги	Реакционная способность	Форма проплавления	Примечания
Ag (99,995%) + 2% O ₂ ; иногда + 1% или + 5% O ₂	Незначительный	Высокая	Незначительная	Заостренная	Уменьшает опасность провисов и улучшает форму шва
Ag (99,995%) + 20% O ₂	Небольшой	»	Слабая окислительная	Линзовидная, глубокое проплавление	
Ag (99,995%) + 20% CO ₂ + 5% O ₂	Средний	»	Окислительная	То же	Обеспечивает наиболее благоприятную форму шва
CO ₂ (99,9%)	Повышенный	Удовлетворительная	Резкая окислительная	Линзовидная, нормальное проплавление	Универсальная защитная среда с позицией переноса капле через дуговой промежуток
CO ₂ (99,9%) + ≤ 20% O ₂	»	Чаще всего низкая	То же	То же	Применяется в Японии для сварки порошковой проволокой

проволоки с наполнителем рутилового типа. Чувствительность этих проволок к изменению сварочного режима гораздо меньше. Допускаются колебания $U_d \pm 5$ в. Аналогично электродам рутилового и целлюлозного типов проволоки устойчивы против следов влаги и ржавчины на кромках свариваемых труб. Следует отметить, что порошковые проволоки ПВС-1, ПВС-3 разработаны специально для трубопроводного строительства и применяются двух типоразмеров: диаметром 1,6—1,8 мм для сварки во всех пространственных положениях и диаметром 2,5 мм для сварки в нижнем и «полувертикальном» положениях. При сварке эти проволоки образуют равномерный обратный валик, и дополнительная подварка изнутри трубы не требуется. Конструкция самих проволок может быть различна: от простого трубчатого до сложнопрофилированного сечения и двойной оболочки. Для улучшения защиты расплавленной капли от азота воздуха предпочтительнее применение проволок сложного сечения.

Сварочные материалы для механизированной газозащитной сварки

Одним из перспективных направлений механизации сварочных работ при монтаже магистральных трубопроводов является полуавтоматическая сварка в среде защитных газов. Впервые в СССР полуавтоматическая сварка трубопроводов в среде CO₂ была применена в 1964 г.

В табл. 27 представлены сведения по сварочно-технологическим характеристикам газовых смесей, перспективных в трубопроводном строительстве.

Таблица 28

Характеристики проволок для сварки в защитных газах

Марка проволоки	Химический состав, %
Экспериментальная (ФРГ)	0,12 C; 1,0—1,1 Si; 1,3—1,4 Mn
То же	0,12 C; 0,4—0,5 Si; 1,0—1,1 Mn (для сварки в смеси Ar+3% O ₂)
ZiS 547	Кремнемарганцовистотитанплатиновая проволока
E60S3	0,12 C; 0,7 Mn; 0,2 Si
E70S	0,40 C; 1,2 Mn; 0,6 Si
E70SG	0,10 C; 1,9 Mn; 0,7 Si; 0,05 Mo
AIS 148620	0,24 C; 0,7 Mn; 0,3 Si; 0,2 Mo; 0,6 Ni; 0,5 Cr
Св-08Г2С	0,05—0,11 C; 0,70—0,95 Si; 1,8—2,1 Mn
Св-10ХГ2СМА	0,07—0,12 C; 0,6—0,9 Si; 1,7—2,1 Mn; 0,8—1,1 Cr; 0,4—0,6 Mo
Св-08ХГ2С	0,05—0,11 C; 0,70—0,95 Si; 1,7—2,1 Mn; 0,7—1,0 Cr
Св-08Г2СМ *	0,05—0,11 C; 0,70—0,95 Si; 1,8—2,1 Mn; 0,4—0,6 Mo

* В ГОСТ 2246—70 отсутствует.

Некоторые сочетания сварочная проволока — защитный газ, обеспечива трубных

Свариваемые трубные стали	Химический состав сварочной проволоки, %			Состав
	C	Si	Mn	CO ₂
Малоуглеродистые нелегированные	0,10	0,62	1,03	—
Малоуглеродистые низколегированные	0,13	0,77	1,32	100
	0,13	0,77	1,32	6,0
	0,13	1,02	1,60	100
	0,13	1,02	1,60	6,0
Малоуглеродистые мелкозернистые низколегированные повышенной прочности	0,12	1,10	1,65	100
	0,12	1,10	1,65	6,0

* При испытании ряда образцов $\alpha_H=0$.

Ющие необходимые свойства металла шва при сварке различных групп сталей [24]

защитного газа, %		Механические свойства металла шва и сварного соединения					
Ar	O ₂	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	α_H , кгс·м/см ² , при T _{исп} , °C			
				+20	-30	-40	-50
97,0	3,0	47	40	13,0	7,5	6,5	6,5
		51	43	14,0	3,0	2,0	*
89,0	5,0	52	47	15,0	7,0	5,2	3,0
		52	43	12,0	4,0	3,0	*
89,0	5,0	53	47	13,0	5,0	4,0	3,0
		58	48	12,0	3,0	2,0	*
89,0	5,0	59	51	15,5	7,0	5,0	3,0

Некоторые порошковые проволоки,

Марка проволоки	Химический состав наплавленного металла, %			
	C	Mn	Si	S, P (каждого не более)
ППАН-4	—	—	—	—
ППАН-8	—	—	—	—
ППАН-10	—	—	—	—
Arcosarc-51	—	—	—	—
Fluxofil-11	0,10	1,20	0,50	0,030
Fluxofil-31	0,10	1,40	0,40	0,030
Fluxofil-35 *	0,06—0,08 *	1,20—1,40	0,30—0,40	0,025

* Содержит 0,4—0,6% Mo.
** По Шарш.

применяемые для сварки в CO₂

Механические свойства металла шва и сварного соединения						
σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	α_H , кгс·м/см ² , при T _{исп} , °C		
				+20	-20	-40
53,4—54,1	42,1—43,1	25,8—28,2	68,9—70,7	16,0	11,0	9,5
55,4—57,2	41,9—44,9	24,5—26,2	66,0—67,0	9,4—11,2	7,8—9,0	6,9—7,2
51,0—53,0	42,4—44,9	28,0—22,5	67,8—77,8	—	—	—
52,0	49,0	30,0	—	12,0	—	—
52,0—58,0	42,0—48,0	22,0—26,0	—	7,0—8,0 **	—	—
52,0—58,0	42,0—48,0	26,0—30,0	—	11,0—12,0 **	4,0—6,0	—
67,0—73,0	61,0—67,0	18,0—22,0	—	10,0—12,0	7,0—10,0	5,0—8,0

Отличительной особенностью сварки в среде защитных газов является резкая зависимость химического состава металла шва от сварочного режима. Так, например, при сварке малоуглеродистой стали в среде CO₂ проволокой, содержащей 0,1% C и 1,0% Si, в металл шва будет переходить 0,3% Si и 0,04% C при крупнокапельном переносе, а при мелкокапельном — 0,7% Si и 0,08% C. Применение в качестве защитной среды Ar и смеси Ar с небольшими добавками CO₂ и O₂ позволяет снизить окислительную спо-

способность атмосферы дуги, применить проволоки с меньшим количеством раскислителей, уменьшить содержание продуктов раскисления в металле шва и увеличить стабильность горения дуги по сравнению со сваркой в среде чистого CO₂. Окислительная способность газовой смеси Ar + 1% O₂ ниже, чем при сварке под наиболее высокоосновными флюсами, а для смеси Ar + 3,5% O₂ окислительная способность та же, что для флюса с основностью 3. Для улучшения защиты расплавленного металла и улучшения

формирования шва при сварке проволоками диаметром 1,6—2,0 мм рекомендуется смесь CO_2 и O_2 . В этом случае при прочих равных условиях a_n металла шва выше, чем при сварке в среде чистого CO_2 .

Высокая окислительная способность атмосферы дуги при сварке в среде CO_2 требует применения проволок с высоким содержанием раскислителей: до 1,2% Si, до 2% Mn, а иногда с добавками Ti и Al. Применение недостаточно раскисленных проволок приводит (кроме невозможности обеспечения равнопрочности сварного соединения) к сильному разбрызгиванию, кипению ванны и неудовлетворительному формированию шва. Установлено, что комплексное раскисление кремнемарганцовистой проволоки, например добавкой Ti, при сварке в защитных газах позволяет существенно повысить сопротивление хрупкому разрушению металла шва. Так, например, чтобы обеспечить гарантированную критическую температуру $T_{кр} = -30^\circ\text{C}$, рекомендуется для сварки в среде аргона ввести в проволоку 0,01% Ti; в CO_2 — 0,04% Ti; в $\text{CO}_2 + 10\% \text{O}_2$ — 0,09% Ti [24].

При автоматической сварке неповоротных стыков труб возможно выполнение корневого слоя шва внутри трубы в смеси газов Ar и CO_2 , заполняющих слоев снаружи — в атмосфере чистого CO_2 . Сварку труб с толщиной стенки 8,5 мм проволокой диаметром 1,0 мм в два слоя следует проводить на следующих режимах. Первый слой: $U_d = 27 \div 28$ в; $I_{св} = 380$ а, $v_{св} = 140$ см/мин, скорость подачи проволоки $v = 1600$ см/мин; второй слой: $U_d = 20$ в; $I_{св} = 210$ а, $v_{св} = 76$ см/мин; $v = 635$ см/мин. Наличие узкой зоны термического влияния, практически полное отсутствие шлака и шлаковых включений, незначительное содержание H_2 в металле шва делают этот метод весьма перспективным для сварки стыков труб из высокопрочных сталей.

В табл. 28 представлены некоторые марки отечественных и зарубежных проволок сплошного сечения, применяемых или перспективных для сварки в среде защитных газов.

В зависимости от типа применяемых трубных сталей используются соответствующие сочетания проволоки и защитного газа (табл. 29). Для улучшения пластических характеристик металла шва рекомендуется применять в качестве защитной среды смесь Ar с O_2 и CO_2 . Следует обратить внимание на невысокие значения a_n при $T_{исп} = -50^\circ\text{C}$, что на данном этапе работ позволяет рекомендовать этот метод сварки только для наиболее благоприятных условий прокладки и эксплуатации трубопроводов.

За рубежом и в последние годы в СССР достаточно широко стали применяться для сварки в среде CO_2 порошковые проволоки (табл. 30). Это позволяет более гибко регулировать механические характеристики металла шва. Введение в сердечник проволоки шлакообразующих компонентов обеспечивает стабильное горение дуги, практически полное отсутствие брызг и хорошее формиро-

вание шва. Снижение содержания O_2 (за счет дополнительной шлаковой обработки сварочной ванны) и N_2 (за счет дополнительной газовой защиты) позволяет получить вязкопластические свойства металла шва на уровне, характерном для электродов фтористокальциевого типа.

ГЛАВА II

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ СТЫКОВ ТРУБ

Металлургическая и технологическая роль связующих

Современная электродная промышленность использует неорганические и реже органические типы связующих. Неорганические связующие могут быть силикатными (жидкое стекло) и бессиликатными (например, алюминат натрия). К числу органических связующих следует отнести ксиметилцеллюлозу, полимерные лаки и смолы.

В качестве силикатных связующих применяют водные растворы силикатов щелочных металлов, главным образом Na, реже K или их смеси. Натриевое жидкое стекло, в отличие от калиевого, обладает более высокой клейкостью и сообщает мокрому замесу лучшие пластические свойства. Калиевое жидкое стекло уменьшает глубину кратера при сварке, улучшает стабильность горения дуги и уменьшает растрескивание электродного покрытия при сушке и прокалке. Для использования преимуществ обоих типов жидких стекол часто применяют их смеси.

Решающее значение при изготовлении сварочных материалов имеет модуль жидкого стекла M , его вязкость η , плотность ρ . От плотности и модуля жидкого стекла зависят последующие технологические свойства сварочных материалов. Вязкость жидкого стекла зависит от силикатного модуля и концентрации раствора.

Алюминат натрия — бессиликатное неорганическое связующее, которое содержит $\leq 59\% \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\geq 41\% \text{Na}_2\text{O}$. Для целей производства сварочных материалов жидкий алюминат натрия поставляется с модулем $1 \pm 0,4$.

Органические смолы и лаки на их основе с каждым годом находят все более широкое применение в народном хозяйстве. При разработке во ВНИИСТ электродов и керамических флюсов нашли применение бакелитовые, фуриловые, фенолформальдегидные и другие лаки, которые применяются для изготовления некоторых влагостойких материалов.

Технологичность связующих при изготовлении электродов во многом определяется их вязкостью, которая для органических связующих, в частности для бакелитового лака, зависит от содержания смолы в лаке. Плотность связующих прямо пропорциональна их вязкости (рис. 1, 2).

Преимуществом органических полимерных связующих является получение влагостойкого покрытия, практически не впитывающего влагу даже при длительном выдерживании электродов в воде (рис. 3). Это свойство весьма ценно при сварке в условиях монтажа на открытом воздухе, особенно во влажном климате или под водой. На рис. 3 показано содержание влаги

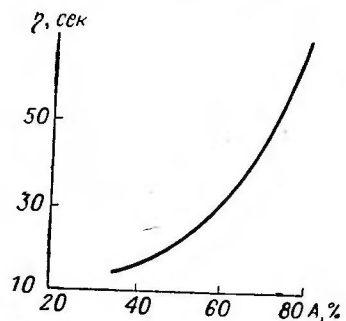


Рис. 1. Зависимость вязкости бакелитового лака (по вискозиметру ВЗ-4) от содержания в нем смолы (А).

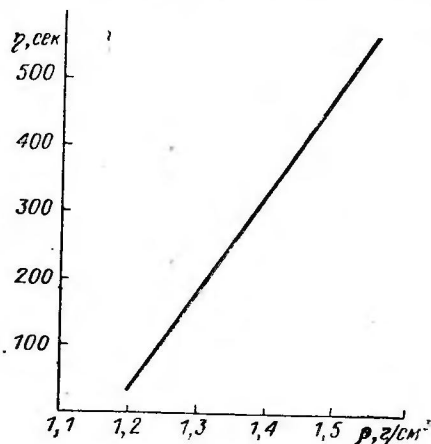


Рис. 2. Зависимость плотности бакелитового лака от его вязкости.

в покрытии (W) при выдерживании электродов в воде длительное время (τ).

Связующее оказывает существенное влияние на сварочно-технологические свойства электродов. Жидкое стекло, например, является источником H_2 , который попадает в металл шва и способствует образованию пор и трещин. Электродное покрытие на жидком стекле содержит гидратированные силикаты, которые даже после сушки электродов при $350-400^\circ C$ не удаляются из покрытия и являются источником повышенного содержания водорода в металле шва. Так, при содержании жидкого стекла (от массы сухой пихты) 16,0; 20,0 и 26,0% содержание $H_{диф}$ в металле шва, наплавленного фтористокальциевыми электродами, составляет соответственно 3,0; 4,5 и 6,5 мл/100 г. Вообще гидратированные силикаты устойчивы в довольно широком температурном интервале ($K_2SiO_3 \cdot 0,5H_2O$ — $370-610^\circ C$; $K_2SiO_3 \cdot H_2O$ — $200-370^\circ C$; $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$ — $285-405^\circ C$; $SiO_2 \cdot nH_2O$ — до $500^\circ C$) и распадаются лишь при более высоких температурах. Другие типы связующих, в частности гидратированные силикаты натрия,

полностью теряют кристаллическую влагу при температурах, близких к $500^\circ C$.

Содержание жидкого стекла в электродном покрытии без ухудшения технологических свойств можно снизить за счет применения высоких давлений при опрессовке электродов, применения соответствующих пластификаторов и увеличения модуля жидкого

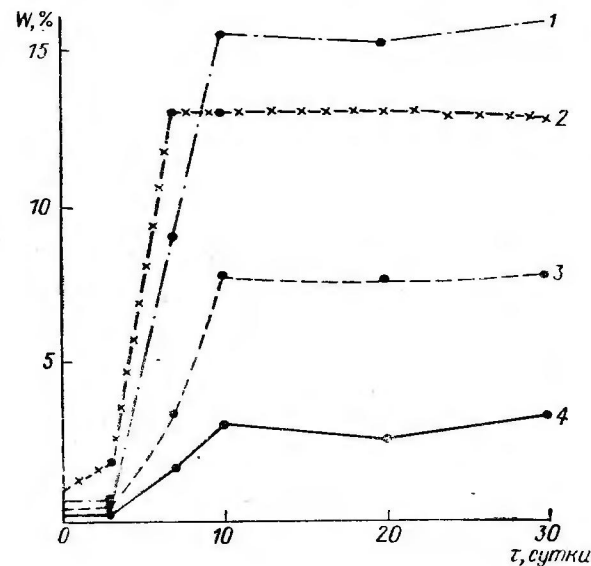


Рис. 3. Сравнительная влагостойкость различных электродных покрытий.

1 — фтористокальциевое (УОНИ-13/55); 2 — рудно-кислосое (ЦМ-7); 3 — рутиловое (ВСР-50); 4 — полимеризующееся.

стекла. Жидкое стекло, введенное в замес, приводит к значительному окислению ферросплавов уже в электродном покрытии. Степень окисления Mn в твердой фазе зависит от плотности жидкого стекла, применяемого для замеса сухой пихты (табл. 31).

Таблица 31

Содержание Mn и его окислов в целлюлозном покрытии, %

ρ , г/см ³	$Mn_{общ}$	$Mn_{мет}$	MnO	Степень окисления Mn , %
1,36	5,8	1,92	5,10	68,0
1,40	5,1	2,40	3,50	53,0
1,45	5,1	2,52	3,40	51,5
1,48	5,5	3,00	3,25	45,5

При прокатке силикатное связующее сварочных материалов теряет лишь часть своей влаги. Так, например, если прокаливать электродное покрытие при 250 °С, потеря массы (ϵ) жидкого стекла на испарение составляет 55% (рис. 4).

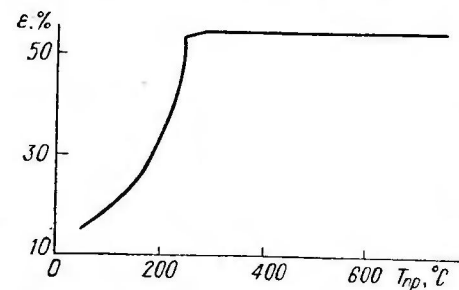


Рис. 4. Потеря массы натриевого жидкого стекла ($M=2,85$; $\rho=1,48$ г/см³) при прокатке.

Уменьшение плотности жидкого стекла приводит к частичной его полимеризации, которая ускоряет процесс влагоотдачи, в результате чего содержание влаги W в покрытии уменьшается (табл. 32).

Более высокий модуль и меньшая плотность жидкого стекла определяют более низкую степень склеивания коллоидных частиц, что дает воз-

можность ускорить сушку электродов, а при прочих равных условиях — повысить влагостойкость электродных покрытий. Известно, что специальная обработка жидкого стекла позволила японской фирме «Кобе стил» разработать высоковлагостойкие электроды, которые позволяют получить металл шва с σ_B , равным 60, 70 и 80 кгс/мм².

Таблица 32

Зависимость влажности целлюлозного покрытия от плотности жидкого стекла ($M=2,6$; $T_{пр}=100 \div 110$ °С; $t=1$ ч)

ρ , г/см ³	Количество жидкого стекла, необходимое для замеса 100 г шихты, см ³	W , %
1,36	125	2,4
1,40	120	3,8
1,42	115	5,0
1,46	110	5,3
1,48	100	6,0

и керамические флюсы, практически не содержащие кристаллизационной влаги. Это значительно упрощает проведение сварочных работ, так как решает проблему упаковки электродов, их хранения и транспортировки, предварительной сушки и прокатки перед применением.

При использовании полимерного связующего иногда удается получить содержание

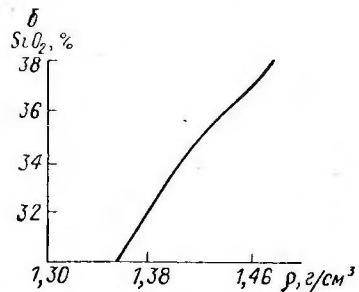
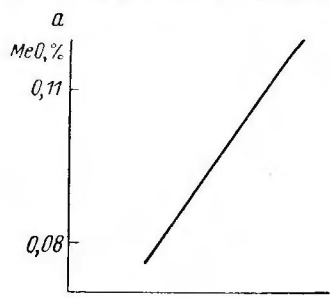


Рис. 5. Зависимость содержания неметаллических включений в металле шва от плотности жидкого стекла. а — всего; б — силикатных от общего количества.

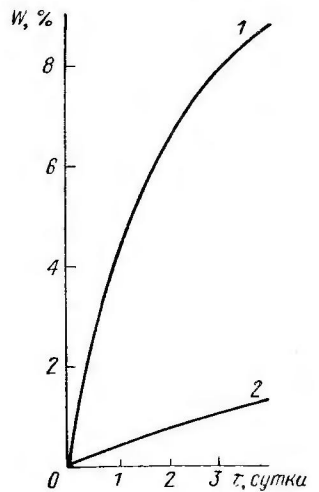


Рис. 6. Содержание влаги во фтористокальциевом покрытии на жидком стекле (1) и полимерном связующем (2) при относительной влажности воздуха 95% и температуре 25 °С.

$H_{пот}$ и газовый состав металла шва, весьма близкие к низководородистым электродам (табл. 33).

В процессе длительного хранения электродов на полимерном связующем даже в условиях, способствующих увлажнению электродного покрытия, содержание влаги в нем увеличивается лишь незначительно (рис. 6).

Замена жидкого стекла алюминатом натрия при производстве, например, керамических флюсов не исключает их гигроскопичности и не способствует снижению содержания H_2 в металле шва. Кроме того, механическая прочность и пластичность обмазочной массы на алюминате натрия обычно хуже, чем на жидком стекле. Однако алюминат натрия способствует образованию при сварке бессиликатных или низкосиликатных шлаков, что предотвращает протекание нежелательных кремневосстановительных процессов (табл. 34).

При сварке электродами, изготовленными на жидком стекле, в основном образуются силикатные шлаки и в металле шва присутствуют главным образом силикатные неметаллические включения. С уменьшением плотности жидкого стекла содержание как общего количества неметаллических включений, так и силикатных включений в металле шва целлюлозных электродов снижается (рис. 5).

В отличие от силикатного связующего (жидкого стекла) полимерные связующие позволяют получить электродные покрытия

Газовый состав наплавки при использовании фтористокальциевых и полимеризующихся электродов

Марка электрода (связующее)	Н плот. см ³ /100 г	Общее содержание газов, см ³ /100 г	O ₂ , %	N ₂ , %	Н плот. см ³ /100 г
УОНИ-13/55 (жидкое стекло)	2000—2200	50—70	0,05—0,06	0,015—0,020	6,3—6,6
ВСП-3 (полимерное)	1850—2200	60—70	0,05—0,07	0,021—0,030	4,2—7,0

Таблица 34

Снижение содержания Si в металле шва и улучшение его механических характеристик при замене жидкого стекла на алюминат натрия (флюс ВДФК-60)

Связующее	Химический состав наплавленного металла, %				α _н , кгс·м/см ² , при T исп, °С		
	C	Mn	Si	Mo	+20	-20	-40
Жидкое стекло	0,10—0,11	1,60—1,70	0,75—0,81	0,48—0,53	12,2—14,4	9,8—10,7	6,8—7,9
	0,10—0,11	1,65—1,72	0,35—0,39	0,45—0,49	14,3—16,4	8,5—10,7	8,3—9,6
Алюминат натрия							4,2—6,4 6,8—9,3

В табл. 35 в обобщенном виде представлены преимущества и недостатки различных связующих, которые могут применяться при производстве сварочных материалов для трубопроводного строительства.

Таблица 35

Свойства различных связующих при производстве сварочных материалов

Тип связующего	Группа связующего	Преимущества	Недостатки
Неорганические	Жидкое натриево-калиевое силикатное стекло и их смеси	Хорошая технологичность обмазочной массы Повышение сварочных технологических свойств	Недостаточная влагостойкость Возможность протекания кремневосстановительных реакций
	Алюминат натрия	Повышение основности шлаков Предотвращение кремневосстановительных реакций	Ухудшение технологичности обмазочной массы Снижение механической прочности частиц керамического флюса
Органические	Полимеризующиеся лаки и смолы	Абсолютная влагостойкость электродных покрытий и керамических флюсов	Некоторое повышение трудоемкости производства сварочных материалов

Металлургическая и технологическая роль сварочных шлаков

Шлаки являются одной из трех фаз, определяющих сварочно-технологические свойства сварочных материалов и степень металлургической обработки сварочной ванны при сварке стыков магистральных трубопроводов. Они должны обладать целым комплексом свойств, который обеспечивает надежную защиту зоны дуги от воздействия окружающего воздуха и гарантирует хорошее формирование шва, легкую отделимость шлаковой корки, отсутствие пор, трещин и других дефектов в сварных швах.

К химико-металлургическим свойствам шлаков относится, например, их способность раскислять и легировать металл шва, связывать окислы в легкоплавкие соединения, способствовать десульфурации металла жидкой сварочной ванны. Химические свойства определяют степень металлургической обработки сварочной ванны, физические свойства — температуру размягчения и плавления, теплоемкость, плотность, вязкость, газопроницаемость, коэффициент линейного расширения. Физико-химические свойства определяют поверхностное и межфазное натяжение,

смачивание и растекание, адгезию к металлу. Все эти свойства в конечном счете обуславливают степень металлургической обработки жидкого металла, а также сварочно-технологические характеристики сварочных материалов.

Сварочные шлаки представляют собой многокомпонентные системы с различными температурными интервалами затвердевания. Металлургические и технологические свойства сварочных материалов в значительной мере зависят от металлургического типа шлаков. В состав шлака входят кислотные, основные и амфотерные окислы, фториды, а также продукты металлургической обработки — сульфиды, нитриды, фосфаты и некоторые другие соединения. При избытке кислотных окислов (SiO_2 и TiO_2) шлак будет кислотным, а при избытке основных (CaO , K_2O , Na_2O , MgO) — основным. Важнейшим показателем активного сварочного шлака считается его способность связывать окислы, нитриды, сульфиды и фосфаты в прочные химические соединения, нерастворимые в металле и легко переходящие в шлак.

Главную роль при переходе нежелательных продуктов из жидкой ванны в шлак и очищении от них металла шва играет химический состав шлака. Установлено, что чем выше основность

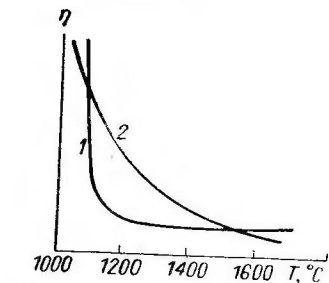


Рис. 7. Схематическое изображение потери вязкости «коротких» (1) и «длинных» (2) шлаков.

шлака, тем активнее эти процессы. Шлаки большинства сварочных материалов, применяемых в трубопроводном строительстве, представляют собой весьма реактивные химически неустойчивые расплавы. В структуре как кислых, так и основных шлаков, как правило, образуется развитая стекловидная фаза. Чем больше доля стекловидной фазы, тем ниже температурный интервал плавления шлака, выше его вязкость. При повышении температуры вязкость многих шлаков с преобладающей стекловидной фазой падает постепенно («длинные» шлаки). Чем больше доля кристаллической фазы (CaF_2), тем уже интервал плавления шлака, выше его жидкотекучесть. При повышении температуры характер полтерм вязкости многих шлаков с преобладающей кристаллической фазой носит экстремальный характер («короткие» шлаки) (рис. 7).

Следует отметить, что независимо от степени основности преимущества «коротких» шлаков для трубопроводного строительства бесспорны. Поэтому практически все применяемые в этой отрасли строительства сварочные материалы обеспечивают «короткие» шлаки.

От вязкости шлаков при температурах металлургической обработки сварочной ванны зависит активность взаимодействия компонентов шлака друг с другом и с металлом, а также степень вы-

деления растворенных в металле газов и шлаковых включений. Например, чем выше отношение

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2}{\text{MnO} + \text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 + \text{CaF}_2 + \text{FO}}$$

тем более вязок шлак, а чем выше отношение

$$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{TiO}_2 + \text{CaF}_2}$$

тем выше точка его плавления [29].

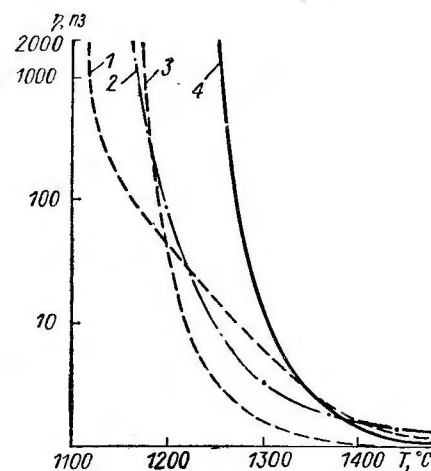


Рис. 8. Температурная зависимость вязкости сварочных шлаков электродов фтористокальциевого типа. 1 — Garant; 2 — Schwarz-3K; 3 — ВСФ; 4 — УОНИ-13/55.

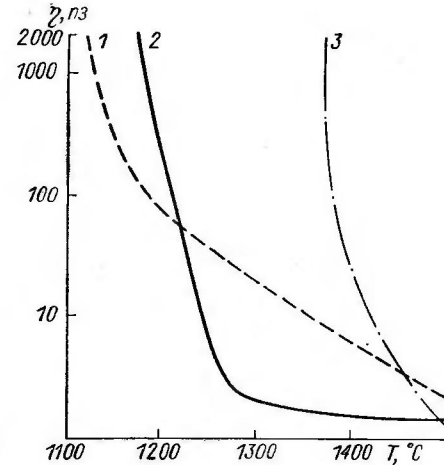


Рис. 9. Температурная зависимость вязкости сварочных шлаков электродов целлюлозного типа. 1 — Fleetweld 5P; 2 — Shield Arc; 3 — ВСЦ-4.

Густые вязкие шлаки плохо пропускают газы. В наплавленном металле в этом случае могут наблюдаться поры. Естественно, что для сварки во всех пространственных положениях необходимы особые свойства шлаков: шлак должен быстро «схватываться» в узком интервале температур вблизи точки его затвердевания. Этим требованиям удовлетворяет шлак, характеризующийся кривой 1 (рис. 7).

Основные «короткие» шлаки присущи покрытиям электродов фтористокальциевого типа, широко применяемым в трубопроводном строительстве (рис. 8). Температурная зависимость вязкости сварочных шлаков при сварке электродами целлюлозного типа представлена на рис. 9. Можно видеть, что кривые вязкости шлаков электродов этого типа, предназначенных для сварки корневого слоя шва, отличаются от кривых вязкости шлаков электродов для заполняющих слоев шва.

При автоматической сварке под слоем флюса использовать для трубопроводного строительства слишком «короткие» сравнительно легкоплавкие шлаки не целесообразно. Так, например, при сварке под флюсом марки АН-348А (рис. 10, 2) нормально «короткий» шлак имеет при температуре жидкого металла вязкость в пределах 4—7 пз, что можно считать оптимальным для сварки стыков труб. Сварка под этим флюсом характеризуется малой чувствительностью к порообразованию в металле шва, шлак легко отделяется даже при сварке в глубокую разделку (при толщине стенки

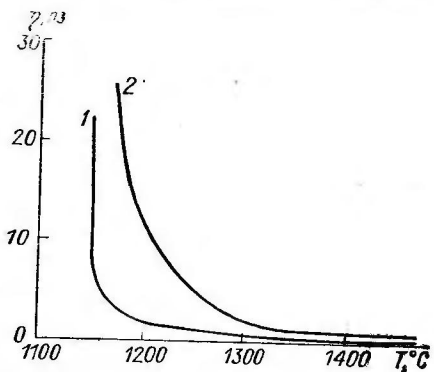


Рис. 10. Температурная зависимость вязкости сварных шлаков при автоматической сварке под флюсом.

трубы 20 мм). Напротив, шлак при сварке под флюсом АН-22 (рис. 10, 1) является чрезмерно «коротким» (с весьма узким интервалом затвердевания), имеющим при температуре жидкого металла вязкость в пределах 1—2 пз, что соответствует лишь условиям сварки листов в нижнем положении [7].

В случае образования чрезмерно «короткого» шлака (типа АН-22), по мнению И. И. Фрумина [14], образуется слишком тонкая стенка флюсовой оболочки, которая имеет низкую прочность,

легко разрушается, плохо восстанавливается, что ухудшает сварочно-технологические свойства флюса. Практика показывает, что при сварке под флюсом АН-22 металл шва в большей степени чувствителен к порообразованию, а шлак хуже отделяется от металла шва, особенно при многослойной сварке в глубокую узкую разделку.

Технологичность сварочных материалов, применяемых в трубопроводном строительстве, во многом определяется поверхностными физическими свойствами сварочных шлаков.

Для обеспечения хорошей кроющей способности шлак должен обладать, по-видимому, достаточно низкими значениями поверхностного и межфазного натяжения на границе раздела с жидким металлом. Например, установлено, что поверхностное натяжение шлаков для плавящихся флюсов, применяемых в трубопроводном строительстве, не превышает 350, для целлюлозных электродов — 400, а для фтористокальциевых электродов — 500 эрг/см². Также установлено, что межфазное натяжение на границе с малоуглеродистым легированным металлом шлаков для плавящихся флюсов, применяемых в трубопроводном строительстве, достигает 1050, для фтористокальциевых электродов — 900, а для целлюлозных — 850 эрг/см².

Производительность и качество сварки во многом зависят от характера отделимости шлаковой корки с поверхности металла шва. Хорошая отделимость шлака особенно важна при многослойной сварке. Большое влияние на отделимость шлаковой корки оказывают как режим сварки, так и химический состав шлака и свариваемого металла. Присутствие в составе шлака поверхностно-активных окислов (MnO, FeO, Cr₂O₃ и др.), улучшающих смачивание металла шлаковым расплавом, увеличивает силу сцепления шлаковой корки с металлом, т. е. ухудшает отделимость шлаковой корки. Плохая отделимость наблюдается при излишней окислительной способности электродного покрытия и флюса, а также при чрезмерном содержании Al₂O₃.

Прочность сцепления шлака и металла определяется преимущественно силами химического взаимодействия. При взаимодействии жидкого шлака с затвердевшим металлом, благодаря его окислительному действию, на поверхности наплавленного металла образуется тонкая пленка комплексных окислов типа шпинелей. Таким образом, сцепление шлаковой корки с поверхностью металла осуществляется через окисную пленку, возникшую на границе раздела металл—шлак. С увеличением значения межфазного натяжения сила сцепления уменьшается. Степень сцепления шлаковой корки с поверхностью металла можно характеризовать величиной адгезии (*W*). С позиции обеспечения сварки в вертикальном и потолочном положении чем выше *W*, тем надежнее универсальность электродов. В то же время, чем выше *W*, тем хуже отделимость шлака. По данным И. И. Фрумина, если $W \leq 900$ эрг/см², то отделимость шлака приемлемая. Однако для большинства целлюлозных электродов, характеризующихся хорошей отделимостью шлака, величина адгезии превышает 900 эрг/см², что свидетельствует о необходимости дополнительного учета влияния на отделимость шлака других факторов.

Установлено, что чем больше разность между коэффициентами термического расширения металла и шлака, тем лучше отделимость шлаковой корки (естественно, без учета химического сцепления). Так, например, при 600 °С разность коэффициентов термического расширения металла и шлака $\Delta(\alpha_{\text{ме}} - \alpha_{\text{ш}})$ для флюса АН-348А составляет около $5 \cdot 10^{-6}$, для флюса АН-43 — $4 \cdot 10^{-6}$, а для флюса АН-22 — $3 \cdot 10^{-6}$. Эти данные совпадают с практическими характеристиками отделимости шлака при сварке стыков труб под указанными флюсами: АН-348А — отличная, АН-43 — хорошая, АН-22 — весьма посредственная.

Металлургическая роль сварочных шлаков определяется тем обстоятельством, что быстропотекающие процессы сварки требуют больших скоростей металлургической обработки сварочной ванны, а это возможно при высокой активности шлаков. В первые моменты образования жидкой ванны под сварочной дугой в расплаве создается шлаковая эмульсия, которая увеличивает поверхность раздела шлак — металл с понижением вязкости шлака в

высокотемпературной области. В результате облегчается поглощение шлаком неметаллических включений и примесей, но одновременно облегчаются и процессы диффузии. Таким образом, от высокотемпературной вязкости шлака зависит активность взаимодействия компонентов покрытия, флюса, заполнителя порошковой проволоки, а следовательно, полнота прохождения реакций, в том числе газонасыщенность металла шва и степень перехода в металл шва легирующих элементов.

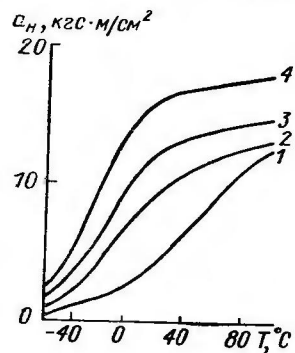


Рис. 11. Зависимость a_n металла шва от содержания в нем фосфора (автоматическая сварка под флюсом АН-348А).

Содержание фосфора, %: 1 — 0,068; 2 — 0,055; 3 — 0,045; 4 — 0,030.

Шлаковая фаза при сварке (помимо защиты сварочной ванны от окружающего воздуха и легирования металла шва) предназначена также для рафинирования металла шва. Особенно активно она должна способствовать снижению содержания S и P. Поскольку S попадает в зону сварки из основного и присадочного металла, компонентов электродных покрытий, заполнителей порошковой проволоки или из сварочных флюсов, то необходимо, прежде всего, контроль содержания ее в исходных материалах.

На изменение содержания в металле шва фосфора и серы загрязненность исходного сырья оказывает большее влияние, чем химический состав шлака (кислый, нейтральный, основной).

Сера резко снижает стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин, так как образует легкоплавкие прослойки по границам столбчатых кристаллитов. Аналогично влияет на образование кристаллизационных трещин P. Кроме того, увеличение содержания P в металле шва резко снижает его a_n как при отрицательных, так и при положительных температурах (рис. 11).

Кремне- и марганцевосстановительные процессы

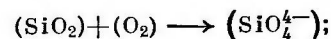
Среди химических реакций, протекающих в процессе металлургической обработки жидкой ванны при сварке стыков магистральных трубопроводов, наиболее существенное значение имеют восстановительные реакции.

Интенсивность этих реакций (в случае сварки под флюсом) определяется следующими параметрами: 1) химическим составом шлаков, в частности содержанием в них анионов свободного кислорода O^{2-} ; 2) химическим составом сварочной проволоки, в особенности содержанием в ней Mn и Si; 3) долей участия основного металла в формировании сварного шва, которая определяется,

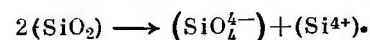
в частности, выбранным способом сварки (в разделку и без разделки, с зазором и без зазора, двусторонняя или односторонняя и т. д.); 4) режимом сварки, в особенности U_d , поскольку при этом увеличивается количество расплавленного флюса на единицу массы жидкого металла, что активизирует металлургическое взаимодействие в системе шлак—металл.

Таким образом, при определенном критическом содержании силикатов и окислов Mn и соответственно при низкой концентрации во флюсе закиси Fe в наиболее горячей части сварочной ванны (непосредственно под сварочной дугой) будут развиваться кремне- и марганцевосстановительные процессы. При этом образующаяся по реакции закись Fe преимущественно переходит в шлак и в меньшей степени — в металл сварочной ванны. Следовательно, металл шва одновременно обогащается Mn и Si.

Активность металлургического взаимодействия между шлаком и металлом зависит от степени диссоциации составляющих шлака. Важнейшей составляющей при этом является O^{2-} . В зависимости от количества O^{2-} в шлаке может развиваться один из двух механизмов диссоциации [32]: а) при избытке O^{2-} (основные и некоторые нейтральные флюсы)



б) при недостатке O^{2-} (кислые и некоторые нейтральные флюсы)



Активный кремневосстановительный процесс (при прочих равных условиях) возможен только тогда, когда кремний в шлаке находится в виде свободного катиона Si^{4+} . Марганцевосстановительный процесс в сварочной ванне, как правило, имеет второстепенное значение. Однако MnO во флюсе тормозит кремневосстановительный процесс тем активнее, чем ниже его содержание. Положительным следствием восстановительных процессов является достижение оптимального легирования металла шва Mn и Si при обеспечении оптимального соотношения этих элементов. Отрицательное следствие этих процессов заключается в засорении металла шва дисперсными эндогенными силикатными включениями, среди которых особенно опасны пленочные, обволакивающие зерна и снижающие вязкопластические свойства металла шва, а также в окислении металла шва, что, в частности, повышает его чувствительность к старению.

При малых концентрациях окислов Mn во флюсе наблюдается не восстановление Mn, а, наоборот, его окисление. При содержании около 10% MnO флюс пассивен по Mn. В случае сварки стыков магистральных трубопроводов таким флюсом является АН-22.

На рис. 12 показано влияние изменения содержания в составе флюса MnO и SiO_2 на интенсивность кремне- и марганцевосстановительных процессов и на a_n металла шва. Изменение содержания

MnO и SiO₂ достигалось за счет применения флюсов АН-348А и АН-22 (крайние точки), а также их смесей в пропорции (%): 50 АН-348А + 50 АН-22; 25 АН-348А + 75 АН-22 и 16 АН-348А +

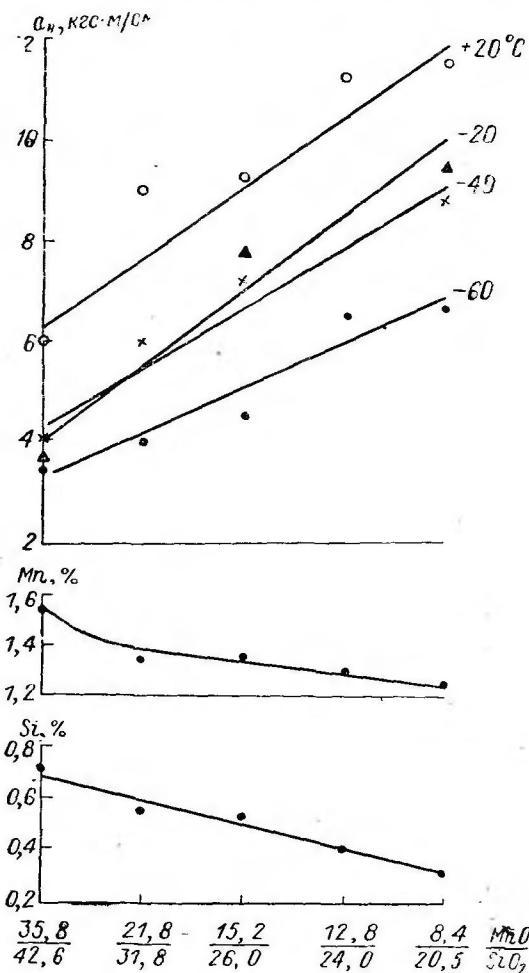


Рис. 12. Влияние отношения MnO/SiO₂ в составе флюсовой смеси АН-348А + АН-22 на a_n и химический состав металла шва.

+ 84 АН-22 (промежуточные точки). Осуществляли сварку в разделку пластин из стали типа Х60 проволокой Св-08ХМ на постоянных режимах. Образцы на химический анализ отбирали из облицовочного слоя шва. Графики показывают, что постепенное снижение содержания SiO₂ во флюсе вызывало ослабление активности кремне- и марганцевосстановительных процессов при одно-

временном существенном повышении a_n металла шва. Поэтому, особенно при сварке мелкозернистых конструкционных сталей повышенной прочности, рекомендуются лишь нейтральные и основные флюсы.

По данным фирмы «Эрликон», при сварке под высокомарганцовистыми среднекремнистыми флюсами возможно восстановление +0,7% Mn и +0,4% Si, а при сварке под среднемарганцовистыми высококремнистыми флюсами +0,4% Mn и +0,7% Si.

Восстановительные реакции протекают в реакционной зоне практически одновременно и в результате взаимного наложения могут изменять кинетику образования и выделения продуктов восстановления, в частности, в этом случае может измениться соотношение между H₂ и O₂ в сварочной ванне.

В случае предотвращения гидратации флюсов и гарантированной защиты сварочной ванны от N₂ воздуха можно предположить, что при сварке под кислым флюсом (АН-348А), когда оба восстановительных процесса протекают в ванне достаточно активно, баланс между H₂ и O₂ не нарушается и чувствительность к порообразованию весьма низкая. В случае склонного к гидратации и пассивного по Mn флюса (АН-22) кремневосстановительный процесс растягивается во времени и тормозит выделение H₂, что при прочих равных условиях повышает чувствительность сварных швов к порообразованию.

Раскисление и легирование металла шва

Известно, что для получения требуемого комплекса свойств металла шва, обеспечивающего его «равноценность» основному металлу, необходимо соответствующее раскисление и легирование металла шва. При этом, как правило, путем простого повторения наплавленным металлом химического состава основного металла практически не удается получить требуемых свойств сварного соединения. Поэтому системы раскисления и легирования, используемые в сварочных материалах для трубопроводного строительства, могут существенно отличаться от принятых в производстве соответствующих трубных сталей.

Некоторые компоненты электродных покрытий вводят в металл шва одновременно как легирующие, так и раскисляющие элементы (например, Mn и Si), другие — только раскислители (например, Ti и Al), третьи — практически лишь легирующие добавки (например, Ni и Mo). Поэтому целесообразно условиться, что (при сварке трубных сталей) легирующими считаются следующие добавки (%): ≥0,8 Mn; ≥0,3 Si; ≥0,3 Mo (Cr, Ni или Cu); ≥0,01 V (Nb или Zr). Добавки, содержащие <0,8 Mn; <0,5 Si, а также 0,01—0,05% Ti или Al можно считать раскислителями, а содержащие <0,3% Mo (Cr, Ni или Cu) — просто неизбежными примесями. При сварке стыков магистральных трубопроводов штучными электродами и порошковой проволокой раскислители в металл шва вводят обычно через электродное покрытие и наполнитель соответ-

ственно, а при сварке под флюсом или газоэлектрической сварке проволокой сплошного сечения через электродную проволоку.

В некоторых фтористокальциевых электродах для раскисления иногда используют Al совместно с Mn и Si (например, ЦЛ-2) или совместно с Mn, Si и Ti (например, ЦП-1/55). Так, для электродов УОНИ-13/55 в качестве раскислителей используют систему Mn—Si—Ti; для электродов Garant — систему Mn—Si; для МР-3, ОЗС-4; ВСЦ-4, ВСЦ-4А — Mn. Комплексное раскисление обычно используется при ручной и механизированной сварке под основными шлаками, а при сварке под кислыми шлаками обычно применяют в качестве раскислителя только Mn.

В процессе раскисления жидкого металла происходит восстановление окислов Fe, при этом продукты раскисления, образуя обособленную фазу, нерастворимую в сварочной ванне, частично всплывают и переходят в шлак, а частично остаются в металле шва в виде неметаллических включений. Естественно, чем «радикальнее» проведено раскисление сварочной ванны и чем полнее удалось перевести продукты раскисления в шлаковую фазу, тем выше вязкопластические свойства металла шва [3]. Подобная закономерность характерна для фтористокальциевых электродов.

Часть Mn или Si, не израсходованная в процессе восстановительных реакций, растворяется в сварочной ванне и является легирующей добавкой; Ti и Al, будучи активными раскислителями, выгорают в процессе сварки практически полностью.

Однако далеко не для всяких сварочных материалов целесообразно комплексное раскисление. Так, например, в случае целлюлозных электродов комплексное раскисление, нарушая, в первую очередь, соотношение между H_2 и O_2 , обычно вызывает пористость сварных швов и, кроме того, резко ухудшает сварочно-технологические свойства электродов (шлак плохо покрывает металл шва, дуга горит неустойчиво и т. д.).

При температурах, близких к температуре существования сварочной ванны, рассмотренные раскислители можно расположить в следующий ряд по их возрастающей активности: Mn → Si → Ti → Al. Однако при высоких температурах, например на стадии образования и переноса жидкой капли, этот ряд может нарушиться; в частности, Mn может стать более активным раскислителем, чем Si, т. е. будет восстанавливать не только Fe, но и Si. Подобная закономерность наиболее характерна для целлюлозных электродов, которые по сравнению с фтористокальциевыми образуют более «горячие» капли на торце электрода. Для этих электродов Mn уже не является слабым раскислителем, он не только достаточно активно раскисляет окислы Fe, но даже восстанавливает часть Si из состава рутилосиликатного шлака (содержание Si в металле шва может достигать 0,25%). Именно этим обстоятельством можно объяснить, что раскисление при сварке целлюлозными электродами только Mn хотя и не является полным, однако обеспечивает достаточно высокие вязкопластические свойства металла шва.

При раскислении и легировании металла шва через электродное покрытие (заполнитель порошковой проволоки, керамический флюс) следует учитывать, что зернистость (гранулометрический состав) металлических добавок зависит от того, являются ли они раскислителями или легирующими компонентами. Так, если компонент — только раскислитель (Ti или Al), следует увеличивать поверхность его взаимодействия с окислительной фазой. Для этого необходим наиболее мелкодисперсный порошок (рекомендуемое сито 2500—3600 отв./см²). Если добавка практически выполняет функции лишь легирования (Mo или Ni), то для уменьшения потерь целесообразно применять более крупную фракцию (сито 1000—1500 отв./см²). Если компонент одновременно является раскислителем и легирующей добавкой (Mn или Si), то его гранулометрический состав обычно занимает промежуточное положение (сито 1500—2500 отв./см²).

Коэффициенты перехода (η) металлических добавок зависят не только от их гранулометрического состава и физико-химических свойств соответствующих элементов, но также и от вида электродного покрытия. При легировании Cr (исходный уровень $FeCr = 1,0\%$) через покрытия различных видов были получены следующие значения η : 0,5—0,6 (МЭЗ-04); 0,6—0,7 (ОЗС-4, ВСЦ-4А); 0,8—0,9 (УОНИ-13/55). Для фтористокальциевого электродного покрытия, наиболее часто употребляемого при сварке в трубопроводном строительстве, получены следующие значения η : 0,96—1,00 (Ni); 0,85—0,92 (Cr); 0,80—0,85 (Mo); 0,55—0,70 (Mn); 0,30—0,35 (V) [7].

На основе анализа систем легирования отечественных и некоторых зарубежных марок электродов и сварочных проволок, применяемых в трубопроводном строительстве, можно сделать следующие выводы.

1. Для сварки труб из сталей обычной прочности ($\sigma_B < 55$ кгс/мм²) используется система легирования практически на основе одного только Mn (до 1%). Поэтому для обеспечения равнопрочности сварного соединения в систему легирования электродов с целлюлозным покрытием, например Fox Cel Mo, предназначенных для сварки заполняющих слоев шва, дополнительно вводят, как правило, Mo (0,3—0,6%).

2. Для сварки труб из мелкозернистых низколегированных сталей, упрочненных микродобавками ($\sigma_B = 55 \div 65$ кгс/мм²), система легирования наиболее часто комплексная: Mn до 1,7, Mo до 0,6%. Значительно реже для этих целей используется система Mn—Ni (проволока PS2Ni, электроды SHV-1, Nibaz-65 и Fox Cel 90). Этой закономерности не подчиняется, в частности, система легирования австрийских электродов Fox EV-63, построенная на основе только одного Mn (до 1,9%). Однако следует отметить, что эта система не оптимальна из-за завышенной концентрации Mn.

3. Для сварки труб из малоуглеродистых низколегированных сталей ($\sigma_B = 65 \div 75$ кгс/мм²), упрочненных дисперсоидами,

обычно используют комплексные системы легирования, построенные, однако, как правило, на базе двойной системы $Mn-Mo$: $Mn-Mo-Cr$; $Mn-Mo-Ni$; $Mn-Mo-V$; $Mn-Mo-Cr-Ni$.

Таким образом, для сварочных материалов, применяемых в трубопроводном строительстве, наиболее важными легирующими элементами являются Mn и Mo . В меньшей степени для рассматриваемых сварочных материалов используют Ni , Cr и реже V (обязательно в сочетании с Mn и Mo).

Молибден — один из наиболее распространенных легирующих элементов в сварочных материалах, используемых для трубопроводов.

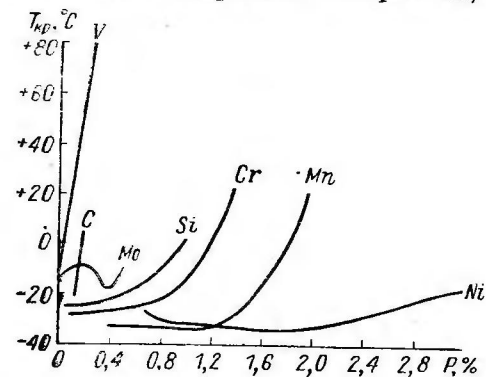


Рис. 13. Влияние содержания легирующих элементов (P) на $T_{кр}$ [12].

в металле шва до 0,2% критическая температура перехода металла шва в хрупкое состояние $T_{кр}$ несколько повышается, а затем при увеличении до 0,4% снижается. При еще более высоком содержании Mo в металле шва (0,5—0,7%) $T_{кр}$ вновь возрастает (рис. 13) [4]. Таким образом, оптимальное содержание Mo в металле шва 0,4—0,5%.

Легирование Mn оказывает благоприятное влияние на σ_B шва и его стойкость против образования горячих трещин. Однако с повышением содержания Mn более 1,7% a_n металла шва начинает снижаться. При комнатной температуре в случае увеличения содержания Mn от 1,2 до 1,8% a_n падает более чем в 2 раза [4]. В ряде случаев применяется комплексное легирование $Mn-Mo$, которое обеспечивает получение достаточно высоких прочностных и одновременно вязкопластических свойств металла шва. Наиболее благоприятное их содержание в металле шва: 0,8—1,6% Mn , 0,25—0,50% Mo .

Добавки Ni в сварочные материалы для трубопроводного строительства обычно обеспечивают высокие значения a_n при отрицательных температурах. При содержании 1,5% Ni улучшаются механические свойства металла шва. Увеличение содержания Ni более 1,5% приводит к некоторому повышению прочности и одно-

временно снижению пластичности [4]. Поэтому содержание Ni в сварочных материалах рассматриваемого типа ограничено до 1,0—1,2% (например, проволока PS2Ni, электроды Nibaz-65).

Добавки Cr , как правило, производят совместно с другими легирующими элементами (наиболее часто в сочетании с Ni и Mo). Это значительно повышает прочностные характеристики. При содержании в металле шва до 1% Cr (в случае комплексного легирования) a_n сохраняется на достаточно высоком уровне.

Небольшие добавки V существенно измельчают зерно, оказывая при этом сильное упрочняющее действие на металл шва. Однако в связи с тем, что V резко повышает закаляемость стали, содержание его в металле шва обычно не превышает 0,2% [4]. Влияние Nb на свойства металла шва во многом аналогично влиянию V .

При ручной дуговой сварке, в частности, стыков магистральных трубопроводов легирование металла шва может осуществляться двумя путями: введением легирующих элементов в электродное покрытие или в электродный стержень. В то же время легирование металла шва через электродный стержень ограничено номенклатурой промышленных легированных проволок. Поэтому в большинстве отечественных и зарубежных электродов легирование металла шва производится через электродное покрытие. При выборе сварочных материалов для трубопроводного строительства следует стремиться, чтобы использованный в них способ легирования не увеличивал неоднородности металла шва. Сварные швы, выполненные на одном и том же металле и имеющие одинаковую конфигурацию, могут иметь разброс по σ_B на целый порядок, а по a_n — даже на два только за счет неизбежной микро-неоднородности металла шва. Наибольший разброс механических характеристик металла шва вызывают колебания его химического состава. Исследования показали, что степень химической неоднородности металла шва для условий трубопроводного строительства практически одинакова при обоих способах легирования, хотя и имеется незначительная тенденция к более равномерному распределению легирующих элементов при легировании через электродный стержень (рис. 14).

Так, например, при распределении хрома вдоль шва среднее квадратическое отклонение σ_{Cr} составляет 0,060 в случае легирования через покрытие (рис. 14, а) и несколько выше (0,066) в случае легирования через электродный стержень (рис. 14, в), а при распределении поперек шва в случае легирования через покрытие (рис. 14, б) σ_{Cr} незначительно выше, чем в случае легирования через электродный стержень (рис. 14, г).

Механизм упрочнения металла шва зависит от типа легирующих элементов, их перераспределения в микроструктуре и содержания в основных структурных составляющих: феррите и карбидной фазе. Наряду с традиционными способами упрочнения твердого раствора (Ni) и увеличением содержания карбидной фазы

путем легирования карбидообразующими элементами (Mo, Cr, V) перспективным является модифицирование металла шва «готовыми» карбидами. Тугоплавкие «готовые» карбиды не успевают

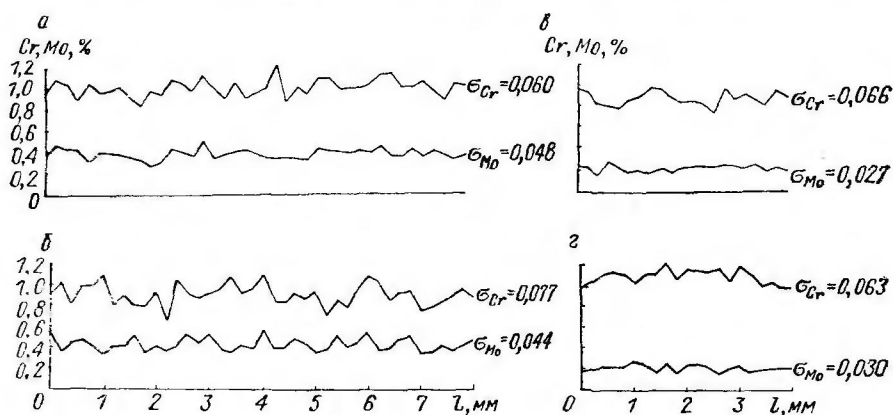


Рис. 14. Влияние способа легирования на степень химической неоднородности металла шва.

полностью расплавиться при переносе электродного металла через дуговой промежуток и создают дополнительные центры кристаллизации в расплавленном металле. В частности, к таким карбидам можно отнести небольшие добавки в электродное покрытие WC и MoC. При этом содержание карбидной фазы в металле шва практически пропорционально содержанию «готовых» карбидов в электродном покрытии. На рис. 15 показано влияние содержания карбидной фазы на свойства металла шва.

Следовательно, упрочнение металла шва искусственными карбидами — одно из наиболее целесообразных направлений получения низколегированного металла шва при разработке сварочных материалов.

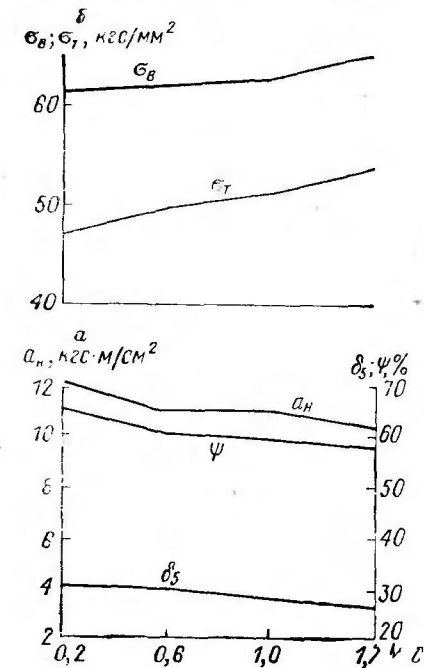


Рис. 15. Влияние содержания «готовых» карбидов в электродном покрытии на прочностные характеристики (а) и пластичность (б) металла шва.

Образование и роль неметаллических включений в металле шва

Неметаллические включения в металле шва можно классифицировать по происхождению, форме и химическому составу. По происхождению они могут быть эндогенными (образовавшимися в металле сварочной ванны в результате металлургических реакций с растворенными в расплаве примесями) и экзогенными (частицы «запутавшегося» в металле сварочной ванны шлака). По форме их можно подразделить на округлые (глобулярные, сферoidalные), червеобразные, полигональные (с остроугольными гранями) и пленочные (межкристаллитные прослойки). По химическому составу их обычно подразделяют на оксиды (силикатные, алюмосиликатные и несиликатные), сульфиды и другие включения (нитриды, карбиды, карбонитриды и т. д.).

В металле шва при ручной и автоматической сварке стыков магистральных трубопроводов в той или иной степени присутствуют все перечисленные виды и типы неметаллических включений. Как видно из табл. 36, максимальное количество оксидных включений характерно для металла, наплавленного целлюлозными электродами и под кислым флюсом — силикатом, а минимальное — при газэлектрической сварке, наплавке фтористокальциевыми электродами и под основным флюсом.

Большинство неметаллических включений в наплавках являются эндогенными. Подобное положение характеризует также целлюлозные электроды. Однако в реальных сварных швах большинство включений имеет смешанное эндогенно-экзогенное происхождение. Весьма часто экзогенные включения служат центрами, вокруг которых формируются эндогенные. В большинстве случаев такими центрами служат полигональные включения основных шлаков, «застывших» в металле шва.

Как следует из табл. 36, в неметаллических включениях в случае наплавки целлюлозными электродами содержится значительная составляющая MgO + CaO, которая, по-видимому, входит в состав экзогенного центра образования эндогенного силикатного включения. Таким образом, образуются включения, комплексные не только по происхождению, но также по форме и составу: в большинстве случаев глобулярные силикатные вокруг полигонального включения, содержащего основные окислы (из сварочного шлака).

Различие форм сульфидных включений обусловлено наличием или отсутствием в жидкой стали специальных центров зародышеобразования. Такими центрами могут быть частицы окислов Fe и Mn, силикаты, а также карбиды Ti, V, Nb. При их наличии сульфиды выделяются по периферии включений на ранних стадиях кристаллизации сварочной ванны [23]. При их отсутствии сульфиды выделяются в виде пленок и цепочек мелких включений в конце процесса кристаллизации. Если V или Nb попадают в

Оксидные и сульфидные неметаллические включения в ме

Марка сварочного материала	Оксиды, %	Содержание в		
		SiO ₂	FeO	MnO
ВСЦ-4	0,09—0,10	35—38	8—10	29—30
Fleetweld 5P	0,095—0,11	34—36	10—13	28—30
Fox Cel	0,09—0,11	38—42	8—11	30—35
АН-348А+Св-08ГА	0,09—0,13	40—47	1,0—3,0	31—38
ПВС-1	0,13—0,17	20—25	3—6	8—10
АН-22+СВ-08ХМ	0,03—0,04	12—15	2,5—5,0	50—55
УОНИ-13/55	0,02—0,03	25—30	25—30	25—35
Св-08Г2С+СО2	0,025—0,065	42—60	8,5—11,0	30—41
Св-08Г2С+Ar	0,010—0,035	55—65	6,0—9,0	25—30

металл шва, например, из основного металла трубы (сварка сталей Х60), то эти примеси нарушают сплошность сульфидных пленок и, по-видимому, уменьшают количество пленочных сульфидных включений, повышая тем самым сопротивление металла шва образованию горячих трещин.

Увеличение относительной площади неметаллических включений ($F_{вкл}$, %) практически не влияет на прочностные характеристики металла, но заметно уменьшает вязкопластические свойства, особенно ψ и a_n .

Что касается формы включений, то по увеличению степени их влияния на свойства металла шва справедлив следующий ряд: глобулярные, полигональные, червеобразные и (наиболее опасные) пленочные. Полигональные остроугольные оксидные включения, действуя как локальный надрез, повышают, в частности, опасность зарождения усталостных разрушений в металле шва.

В образовании пленочных включений следует выделить два основных механизма, которые условно можно назвать «кристаллизационным» и «физико-химическим». Первый основан на предположении, что пленочные включения могут образовываться из первичных глобулярных включений под давлением растущих дендритов кристаллизующегося металла. Постепенно включения деформируются и принимают вид пленок. Второй механизм основан на предположении, что в процессе понижения температуры сварочной ванны из перенасыщенного примесями раствора выделяются монооксиды типа SiO или TiO, образование которых весьма вероятно при сварке под руднокислыми шлаками (а также при сварке целлюлозными электродами, проволокой ПВС). В сочетании с некоторыми другими окислами или же ликвирующими атомами O₂ монооксиды Si и Ti образуют вокруг растущих

таже, наплавленном некоторыми сварочными материалами

оксидах, %			Сульфиды, %	Содержание в сульфидных, %	
TiO ₂	CaO+MgO	Al ₂ O ₃		MnS	FeS
4—6	18—21	—	0,08—0,011	24—26	74—76
2—3	17,5—20,5	—	0,05—0,08	He опр.	He опр.
5—7	18—20	—	0,060—0,090	»	»
He опр.	3—6	2,0—3,0	0,12—0,14	52—58	42—48
8—13	20—35	4—8	0,08—0,10	25—30	70—75
He опр.	12—15	2,5—5	He опр.	He опр.	He опр.
»	He опр.	6—8	0,041—0,053	37—40	60—63
»	»	1,5—8	He опр.	He опр.	He опр.
»	»	1,5—8	»	»	»

кристаллов тончайший аморфный слой — стекловидную пленку. В ряде случаев образование пленок можно связывать только с атомами O₂, поскольку этот элемент, обладая высокой поверхностной активностью и малой растворимостью в твердом металле перед фронтом растущих кристаллитов, может создавать тонкий переходный слой. С изменением концентрации O₂ в этом слое в первую очередь формируются тонкие аморфные прослойки. Следовательно, образование пленочных включений возможно при сварке под кислыми шлаками в случае активных кремневосстановительных процессов и повышения содержания O₂ в металле шва. Именно эти межкристаллитные силикатные прослойки, как правило, снижают a_n и повышают $T_{кр}$ металла шва.

Чем ближе форма неметаллических включений к глобулярной, тем выше эффективная поверхностная энергия образования трещин, а следовательно, меньше опасность зарождения микротрещин от неметаллических включений.

Глобулярные включения обычно не влияют на распространение трещин, а полигональные — могут изменять траекторию их распространения.

Как следует из табл. 36, по химическому составу для сварочных материалов, применяемых в трубопроводном строительстве, наиболее характерны оксидные включения, состоящие из силикатов Fe и Mn. В случае использования в качестве раскислителя Al или глиноземистых шлаков возможно образование алюмосиликатных включений (например, под флюсами АН-22 или АН-43). Несмотря на высокое содержание рутила в шлаке при сварке целлюлозными электродами, концентрация титанатов в составе неметаллических включений весьма незначительна.

Общее содержание сульфидных включений для всех исследованных сварочных материалов практически одинаково. Однако

отрицательное влияние этой фазы во многом связано с ее составом. Наиболее неблагоприятной формой соединений серы, как известно, являются FeS. Именно эта легкоплавкая составляющая в наибольшей степени склонна к образованию в междодритных пространствах эвтектики в форме пленок. Более благоприятно тугоплавкое соединение MnS, которое обычно образует глобулярные включения. Это обстоятельство во многом определяет различную чувствительность металла, наплавленного различными электродами, к образованию горячих трещин.

С позиций уменьшения общего содержания неметаллических включений в металле шва весьма важно ограничить поступление в жидкую ванну дополнительных примесей из шлака или газа, что достигается увеличением доли газовой или шлаковой фаз, не растворенных в свариваемом металле.

Поглощение газов металлом шва

В металле сварного шва, независимо от способа сварки стыков трубопроводов, неизбежно присутствие примесных газов: O_2 , H_2 и N_2 , которые, как правило, ухудшают как механические характеристики металла шва, так и эксплуатационную надежность сварных соединений. Источники поступления газов в металл шва при сварке: окружающая атмосфера, компоненты сварочных материалов, продукты металлургических реакций, влага сварочных материалов, влага и загрязнения на кромках свариваемых труб.

Характер и кинетика поглощения газов определяются типом сварочных материалов. Так, например, при сварке под флюсом O_2 и пары металла поглощаются как каплями, так и сварочной ванной; при сварке в среде CO_2 насыщение жидкого металла, в частности O_2 , происходит в основном на стадии капли, а лишь после перенасыщения капли идут реакции окисления Si и Mn.

Кислород в металле шва находится в растворенном состоянии, образуя с железом твердый раствор внедрения, а также в виде окислов Fe, Si, Mn и т. д. От общего O_2 в металле шва, определяемого методом вакуум-плавления, растворенный O_2 составляет приблизительно 10—30%. Концентрация O_2 в металле шва в основном определяется активностью реакций раскисления металла шва.

Азот в металле шва находится в растворенном состоянии, образуя с Fe твердый раствор внедрения, а также в виде нитридов Si, Fe, Ti, Mn, V. При газозащитной сварке проволоками с высоким содержанием Mn и Si происходит, возможно, образование труднорастворимого нитрида Si_3N_4 , который связывает 8—47% N_2 . Этот нитрид способствует улучшению механических характеристик металла шва, что является одной из причин необходимости повышения содержания Si в проволоке при сварке в среде активных газов.

Источником поступления N_2 в металл шва является, прежде всего, окружающая атмосфера, так как расплавленный металл

в процессе сварки не всегда достаточно надежно от нее защищен. Поэтому толщина электродного покрытия и шлакового покрова, наличие газообразующих компонентов в составе электродного покрытия или шихте порошковой проволоки, а также давление (расход) защитного газа оказывают непосредственное влияние на содержание N_2 в металле шва.

Для N_2 и O_2 справедлив закон взаимной растворимости. Однако следует учитывать, что наличие O_2 в атмосфере дуги способствует переносу N_2 в жидкий металл благодаря образованию в дуге газообразного оксида NO, легко растворяющегося в жидком металле.

Водород при сварке в монтажных условиях является наиболее опасным примесным газом, так как на его поглощение металлом шва влияет целый ряд факторов: металлургический тип сварочных материалов, условия их хранения, степень чистоты свариваемых кромок и т. д. Растворимость H_2 в металле шва зависит от его парциального давления в атмосфере дуги и температуры металла. Максимальная растворимость водорода в жидком железе наблюдается при 2450—2500 °С, т. е. при температуре существования капли на торце электрода. Содержание H_2 в металле шва определяется соотношением H_2 , быстро поглощенного в этих высокотемпературных зонах (за 4—5 сек достигается равновесие), и H_2 , выделившегося из жидкого металла вне активного пятна за тот же промежуток времени.

Для O_2 и H_2 , находящихся в жидком металле, также справедлив закон взаимной растворимости. При определении взаимной растворимости N_2 и H_2 следует учитывать целый ряд факторов, в частности возможность образования аммиака.

Как следует из табл. 37, при дуговой сварке штучными электродами содержание газов в металле шва определяется в основном металлургическим типом электродного покрытия, причем наибольшее значение имеют процессы, связанные с поглощением и выделением H_2 . Содержание H_2 в металле шва при сварке фтористокальциевыми электродами зависит главным образом от влажности электродного покрытия, причем даже незначительное увлажнение покрытия (до 0,8—1,2%) может привести к увеличению содержания $H_{диф}$ в металле шва до 10 см³/100 г (рис. 16, а). Содержание H_2 в металле шва при сварке электродами целлюлозного типа — высокое и также зависит в основном от влажности электродного покрытия (рис. 16, б).

Для автоматической сварки под флюсом обычно характерно весьма низкое содержание N_2 (0,015—0,020%) и повышенное содержание O_2 (0,010—0,050%).

При сварке в среде CO_2 содержание O_2 в металле шва определяется содержанием раскисляющих элементов. Снижение содержания O_2 наблюдается при сварке в смеси газов CO_2 и Ar. Содержание H_2 в металле шва при полуавтоматической сварке в среде Ar + O_2 обычно минимальное и зависит в основном от влажности защитного газа.

Содержание газов в металле шва при различных методах сварки

Способ сварки	Марка сварочного материала	Общесодержание газов, см ³ /100 г	H _{диф} , см ³ /100 г	H _{ост} , см ³ /100 г	O ₂ , %	N ₂ , %
Ручная дуговая сварка штучными электродами	УОНИ-13/45; УОНИ-43/55; ВСФ-60, ВСФ-65 ВСФС-50; ВСФС-60 ВСП-4; ВСП-4А; Fleetweld 5P; Shield Arc 85; Fox Cel O3C-4; O3C-6; АНО-4; МР-3	40—60 50—70 70—110	2—8 2—4 25—50	4—8 3—5 14—25	0,010—0,015 0,010—0,013 0,020—0,050	0,020—0,025 0,020—0,025 0,040—0,015
	Автоматическая сварка под слоем	70—110	28—44	12—16	0,030—0,060	0,015—0,020
Полуавтоматическая сварка в среде защитных газов	АН-22+Св-08ХМ АН-348+Св-08ГА ВСКФ-60+Св-08	70—100 110—150 60—80	— — 20—50	8—9 5—7 15—25	0,025—0,051 0,029—0,034 0,010—0,020	0,045—0,020 0,015—0,020 0,015—0,020
	Св-08Г2С+СО ₂ Св-08Г2С+Аг+3%О ₂	60—80	2,0—4,0 1,0—1,5	3—5 1,0—1,5	0,040—0,070	0,040—0,020 0,008—0,015
Полуавтоматическая сварка самозащитными порошковыми проволоками	ПВС-1 ПВС-1Л ПВС-3	110—130 110—140 90—110	25—35 25—35 12—15	14—16 14—16 6—10	0,030—0,040 0,040—0,050 0,030—0,040	0,030—0,050 0,040—0,060 0,030—0,040

Характерной особенностью полуавтоматической сварки порошковой проволокой является повышенное содержание N₂ в металле шва, которое вызвано, прежде всего, недостаточной защитой металла жидкой капли, поскольку шихта введена внутрь металлической оболочки, и большими плотностями тока.

Введение строго ограниченного количества газообразующих компонентов в состав заполнителя способствует некоторому снижению N₂ в металле шва. Одним из эффективных путей снижения N₂ в металле шва при сварке самозащитными порошковыми проволоками является применение проволок сложной конструкции. При этом, чем более развита в сечении доля защиты металла от N₂ воздуха. Содержание N₂ в металле шва зависит от толщины шлакового покрова или электродного покрытия, наличия газообразующих компонентов в покрытии, расхода защитного газа и т. д. (табл. 38).

Таким образом, содержание O₂ в металле шва определяется в основном металлургическим типом сварочных материалов и зависит от интенсивности и направления окислительно-восстановительных реакций. Содержание H₂ зависит, прежде всего, от содержания органических компонентов и уровня влажности применяемых сварочных материалов. Содержание N₂ зависит от степени надежности защиты расплавленного металла от окружающей атмосферы. По общему содержанию газов сварочные материалы, применяемые в трубопроводном строительстве, можно расположить в следующий убывающий ряд: самозащитные порошковые

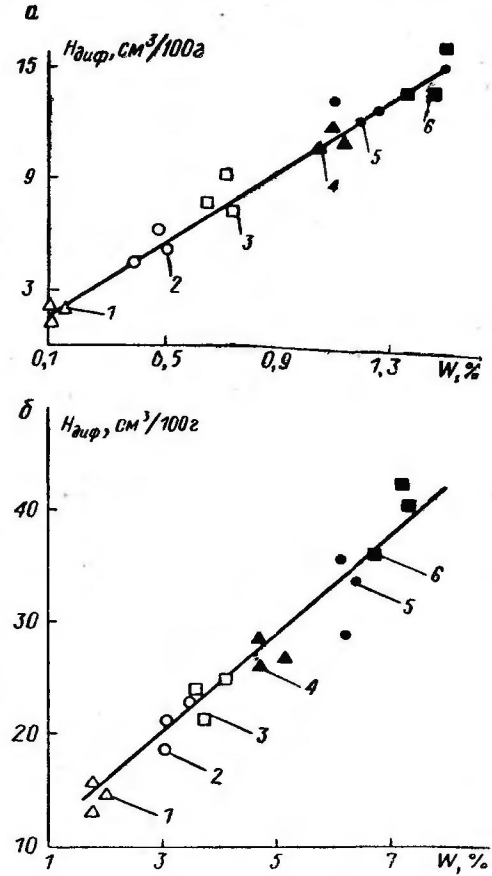


Рис. 16. Влияние относительной влажности электродного покрытия на содержание H_{диф}.
1 — сразу после сушки; выдержка в гидростате: 2—3 ч; 3—6 ч; 4—2 суток; 5—15 суток; 6—30 суток.

Таблица 38

Влияние изменений условий защиты на содержание N_2 в металле шва для различных сварочных материалов

АН-348А+Св-08А (D=3 мм)		Электрод типа ВСЦ (D=4 мм), толщина покрытия на сторо- ну 0,8 мм		CO ₂ + проволока (D=1,6 мм), содер- жащая (%): 0,12C; 1,09Si; 1,36Mn		Ag+3% O ₂ +прово- лока (D=1,6 мм), со- держащая (%): 0,12C; 0,45Si; 1,05Mn	
Толщина слоя флюса, мм	N ₂ , %	Содержа- ние цел- люлозы в покры- тии, %	N ₂ , %	Расход газа, мин	N ₂ , %	Расход газа, л/мин	N ₂ , %
45	0,0110	10	0,0160	4	0,0160	10	0,0140
30	0,0160	20	0,0140	10	0,0156	12	0,0130
20	0,0480	40	0,0110	16	0,0110	15	0,0102
10	0,0980	80	0,0088	20	0,0110	18	0,0083

Примечание. Критическое (с позиций порообразования под действием азота) содержание N₂: для АН-348А+Св-08А—0,03%, для электродов ВСЦ и сочетания CO₂+ проволока—0,02%; для сочетания Ag+3% O₂+ проволока—0,015%.

проволоки — целлюлозные электроды — плавные флюсы + + проволоки — защитные газы + проволоки — фтористокальциевые электроды.

Помимо металлургического типа сварочных материалов на содержание газовых примесей в шве влияют также режимы сварки. Например, увеличение U_д, как правило, приводит к увеличению содержания N₂ в металле шва.

При газозащитной сварке увеличение I_{св}, рост диаметра сварочной проволоки и повышение v_{св} приводит к снижению содержания N₂ в металле шва. При сварке под флюсом с увеличением I_{св} содержание O₂ в металле шва уменьшается для кислых флюсов, практически не изменяется для нейтральных и возрастает для основных. Присутствие газов в сварных швах приводит к снижению механических характеристик, порам в металле шва, образованию холодных трещин в сварных соединениях и т. д.

На рис. 17 представлено влияние O₂ на механические свойства малоуглеродистой стали. При этом отрицательно влияет как растворенный, так и связанный O₂, который, образуя окисные неметаллические включения с Fe, Mn, Si и т. д., ухудшает механические характеристики металла шва.

Азот существенно изменяет механические свойства стали. С увеличением содержания N₂ в стали прочностные свойства возрастают, а пластические — падают (рис. 18). Кроме того, как O₂, так и N₂ в металле шва способствуют процессам старения.

Влияние N₂ на механические свойства металла шва проявляется различным образом. Водород, находящийся в металле шва,

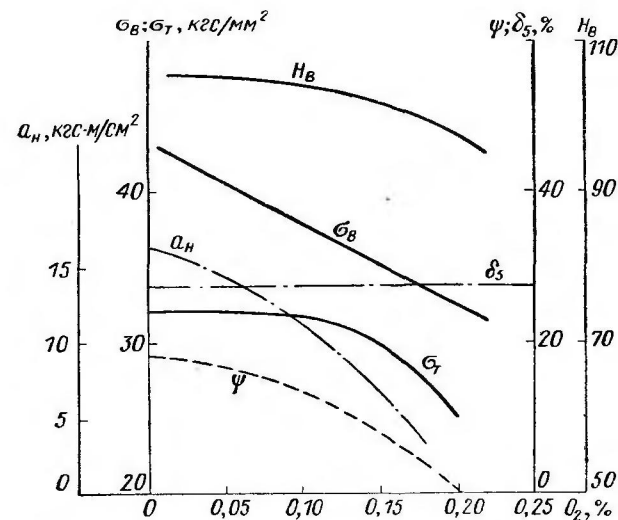


Рис. 17. Влияние кислорода на механические свойства малоуглеродистой стали [34].

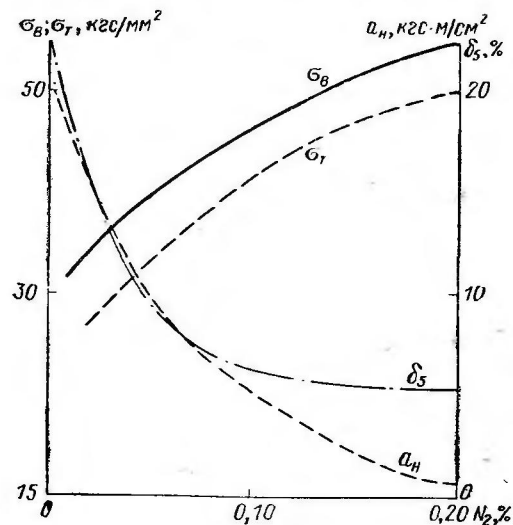


Рис. 18. Влияние азота на механические свойства малоуглеродистой стали [34].

непосредственно повышает склонность сварного соединения к трещинообразованию. Косвенно влияние N₂ проявляется (при испытании на растяжение) в снижении пластических свойств металла шва вследствие возникновения дефектов типа «рыбьих глаз», фло-

кенов, белых пятен. При длительном вылеживании либо нагреве после сварки на 200—250 °С в течение 2—6 ч (дефлокирование) происходит удаление диффузионноподвижного водорода и пластические свойства металла шва восстанавливаются.

Прямым проявлением повышенной газонасыщенности металла шва является наличие пор. Поры в сварных швах связаны с процессами, происходящими в макро- и микрообъемах. При объемном пересыщении жидкого металла сварочной ванны газами в результате охлаждения и соответственно уменьшения растворимости возможно образование макропор. При локальном пересыщении жидкого металла у фронта кристаллизации зарождение пузырьков газа наиболее вероятно при остановке роста кристаллов. В этом случае в результате диффузии атомов (ионов) газа из прилегающих микрообъемов металла происходит развитие микропор [10]. Для каждого вида сварки существуют свои критические концентрации по поглощению газов без порообразования.

Так, например, при рассмотрении пористости, обусловленной N₂, установлено (см. табл. 38), что в случае сварки в среде Ar + O₂ увеличение содержания N₂ > 0,015% уже повышает чувствительность к пористости, а при сварке под флюсом АН-348А опасность образования пор возникает лишь при содержании N₂ > 0,03%. Поэтому все факторы, ухудшающие защиту расплавленного металла от N₂ воздуха, способствуют образованию так называемой «азотистой» пористости.

С позиций порообразования в зависимости от вида сварочных материалов доминирует та или иная газовая примесь. Как видно из табл. 42, для газозлектрической сварки весьма характерна «азотистая» пористость, которая сравнительно легко устраняется соответствующим изменением технологии сварки. Появление «азотистой» пористости при сварке самозащитной порошковой проволокой также связано с недостаточной защитой расплавленного металла от атмосферы, но является отличительной особенностью этого метода сварки, так как сама «конструкция» проволоки заранее предопределяет недостаточную эффективность защиты. Расчеты и практический опыт показывают, что в случае, например, сварки порошковой проволокой ПВС-3 чувствительность к «азотистой» пористости возрастает при содержании N₂ > 0,04%.

При сварке целлюлозными электродами наиболее характерно появление «водородистой» пористости, которая возникает как при слишком малой, так и при весьма большой влажности электродного покрытия. В условиях слишком низкой влажности электродных электродов (< 1,5%) интенсификация кремневосстановительных процессов замедляет диффузию H₂ из сварочной ванны, делает «вялым» газовыделение из кристаллизующегося металла. Слишком высокая относительная влажность (> 7%) в результате появления в сварочной ванне интенсивных турбулентных потоков затрудняет направленное выделение газовых пузырьков из бурно кипящей сварочной ванны.

При сварке фтористокальциевыми электродами чем ниже влажность электродного покрытия, тем меньше опасность образования пор. Практика показывает, что в данном случае поры возникают уже при относительной влажности > 0,6%. По-видимому, в данных условиях наличие активных раскислителей и интенсификация восстановительных процессов начинают тормозить выделение H₂ из сварочной ванны. При небольшой относительной влажности (0,2—0,3%) содержание H₂ в ванне не превышает растворимость H₂ в жидком Fe при температуре плавления и поры не возникают.

«Водородистая» пористость появляется и при сварке другими сварочными материалами, которые подвергались гидратации или для которых характерны активные кремневосстановительные процессы: автоматическая сварка под флюсом (влажность флюса > 0,20), сварка в среде CO₂ (влажность сжиженной углекислоты > 0,3%), а также при наличии влаги и ржавчины на свариваемых кромках, на поверхности сварочной проволоки и т. д.

Образование пор в результате окисления углерода возможно при сварке теми сварочными материалами, в которых повышено содержание C_{пот} (среднеуглеродистая проволока, высокоуглеродистые ферросплавы в покрытии электродов, заполнители порошковой проволоки и т. д.). Так, например, если при сварке целлюлозными электродами в металл шва переходит свыше 0,15% C, то резко повышается чувствительность к порообразованию.

Наиболее сложен механизм порообразования при совместном влиянии H₂ и N₂. Установлено, что в присутствии H₂ при автоматической сварке под флюсом пористость от N₂ наступает при меньшем его содержании. Кроме того, о преобладании определенного вида пористости можно судить по газовому составу пор в металле шва (табл. 39) [25]. По данным табл. 39 можно предположить,

Таблица 39

Газовый состав пор при газозлектрической сварке стали, содержащей (%): 0,19C; 0,06Si и 0,68Mn (толщина пластин 10 мм), проволокой, содержащей (%): 0,09C; 0,7Si; 1,77Mn; 0,17Mn; 0,17Cu (D = 1,6 мм)

Защитный газ	Расход, л/мин	Наличие пор при рентгеновском просвечивании	Химический состав макро- и микропор, %				
			CH ₄	CO	H ₂	N ₂	Ar
CO ₂	20	Нет	—	12	20	68	—
CO ₂ +O ₂	15+5	»	—	9—13	17—25	70—91	—
CO ₂ (масло на поверхности)	20	Есть	3	38	42	17	—
CO ₂ (ржавчина на поверхности пластин)	20	»	—	28	67	5	—
Ar	20	»	—	14—17	11—15	53—56	14—21
Ar+CO ₂	15+5	»	—	13—16	12—16	70—75	3—17

что при сварке в резко окислительной атмосфере (CO_2 и $\text{CO}_2 + \text{O}_2$) основной причиной возникновения микропористости (не выявляемой рентгеновским просвечиванием) является N_2 . При наличии загрязнений на поверхности пластин (масла, ржавчины) образование пор в основном связано с H_2 . При сварке в инертной или слабоокислительной среде (Ar , $\text{Ar} + \text{CO}_2$), возникновение пористости связано кроме H_2 с примесями Ar , который, по-видимому, захватывается каплей в дуговом промежутке. Турбулентные потоки, захватывающие Ar , можно устранить, применяя в качестве защитной среды более окислительную атмосферу ($\text{CO}_2 \geq 15\%$) [25].

ГЛАВА III

ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВАРИВАЕМОСТЬ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Влияние сварочных материалов на диффузию и распределение H_2 в сварном соединении

К. Котрелл образно назвал H_2 «барьером сварочного прогресса». Действительно, на первом этапе трубопроводного строительства применение высоководородистых целлюлозных электродов позволило значительно повысить темп сварочно-монтажных работ. Многолетний опыт строительства и эксплуатации трубопроводов из обычных малоуглеродистых низколегированных кремнемарганцовистых трубных сталей подтвердил все преимущества целлюлозных электродов. Однако широкое распространение трубных сталей, упрочненных дисперсоидами, а также строительство трубопроводов на Крайнем Севере привели к целому ряду ограничений при использовании целлюлозных электродов. При этом оказалось, что практические проблемы сварки в той или иной степени связаны с содержанием H_2 в сварном соединении.

Вследствие высокой подвижности H_2 в металле шва определяется в двух состояниях: в виде диффузионноподвижного газа ($\text{H}_{\text{диф}}$), склонного самопроизвольно выделяться из металла шва, и в виде остаточного газа ($\text{H}_{\text{ост}}$), входящего в состав твердого раствора и окклюдированного в молекулярном состоянии поверхностью различных микронесплошностей или посторонних включений. Легирующие добавки V, Nb, Ti могут увеличивать содержание H_2 в металле шва за счет образования специфической гидратной фазы.

Что касается H_2 , то его общая диффузия в сварном соединении складывается из трех компонентов: 1) изотермической или концентрационной диффузии (при наличии градиента концентраций поток H_2 будет перемещаться от большей концентрации к меньшей, пока не произойдет их выравнивание); 2) термической диффузии,

т. е. перепада концентраций, вызванного разностью температур и различной растворимостью водорода при этих температурах; 3) диффузией от перепада растягивающих напряжений (поток водорода всегда будет направлен к более напряженным участкам; при этом градиент напряжений оказывает влияние в основном на перераспределение H_2 в ЗТВ и в значительно меньшей степени сказывается на перераспределении других газообразующих примесей в той же зоне).

В зависимости от конкретных условий сварки, типа электродного покрытия, микроструктуры основного металла, начальной температуры сварки, времени после окончания сварки доминирует, по-видимому, (при прочих равных условиях) какой-либо один вид диффузии. Растворимость H_2 в металле шва зависит от его парциального давления в атмосфере дуги, которое, в свою очередь, определяется металлургическим типом и влажностью сварочного материала, режимом сварки, химическим составом и структурой основного металла, толщиной стенки свариваемых труб и т. д. В расплавленной ванне при сварке целлюлозными электродами может содержаться 50—60 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ H_2 . Применяя низководородистые сварочные материалы либо ускоряя удаление $\text{H}_{\text{диф}}$ из металла шва, можно регулировать уровень H_2 в металле шва.

Скорость диффузии H_2 из металла шва существенно зависит от температуры. Так, например, при 37,7 °С скорость диффузии составит всего 0,02, при 100 °С — 42, а при 216 °С даже 220 $\text{см}/\text{сек}$. Причем, время, необходимое для выделения $\text{H}_{\text{диф}}$, находится в квадратичной зависимости от пути диффузии.

На рис. 19 представлены данные по влиянию последующего нагрева на уровень $\text{H}_{\text{диф}}$. Применяя предварительный подогрев, а также технологию сварки, предусматривающую наличие «горячего» прохода, можно снизить скорость охлаждения металла шва и тем самым снизить до безопасного (5—10 $\text{см}^3/100 \text{ г}$) уровень $\text{H}_{\text{диф}}$ в металле шва. В табл. 40 представлены данные по влиянию некоторых технологических факторов на содержание $\text{H}_{\text{диф}}$ в металле шва при сварке стали типа X60 целлюлозными электродами.

Однако образование трещин в сварном соединении вызывает не вообще высокое содержание H_2 в металле шва, а его неравно-

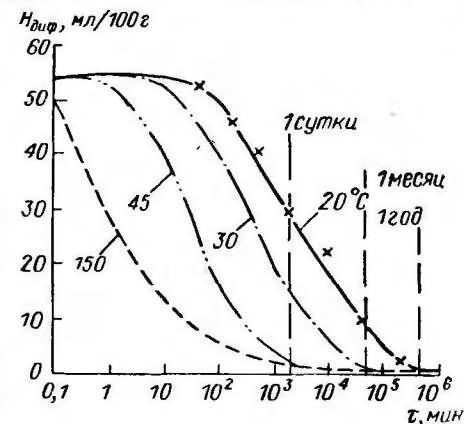


Рис. 19. Влияние температуры и длительности выдержки на содержание $\text{H}_{\text{диф}}$ в металле шва при сварке целлюлозными электродами [32].

Таблица 40
Влияние технологии сварки на содержание H_2 , $см^3/100 г$

Метод сварки	$H_{диф}$	$H_{ост}$	$H_{сумм}$
Сварка при $+20^\circ C$; при скорости охлаждения в интервале $300-100^\circ C$ (первый слой), $^\circ C/сек$:	160	6,9	31,1
	40	12,4	29,6
	4	13,2	28,6
Сварка пластин при $-20^\circ C$ с «горячим» проходом при скорости охлаждения, $^\circ C/сек$:	160	10,6	30,1
	40	12,8	27,8
	4	13,1	25,7

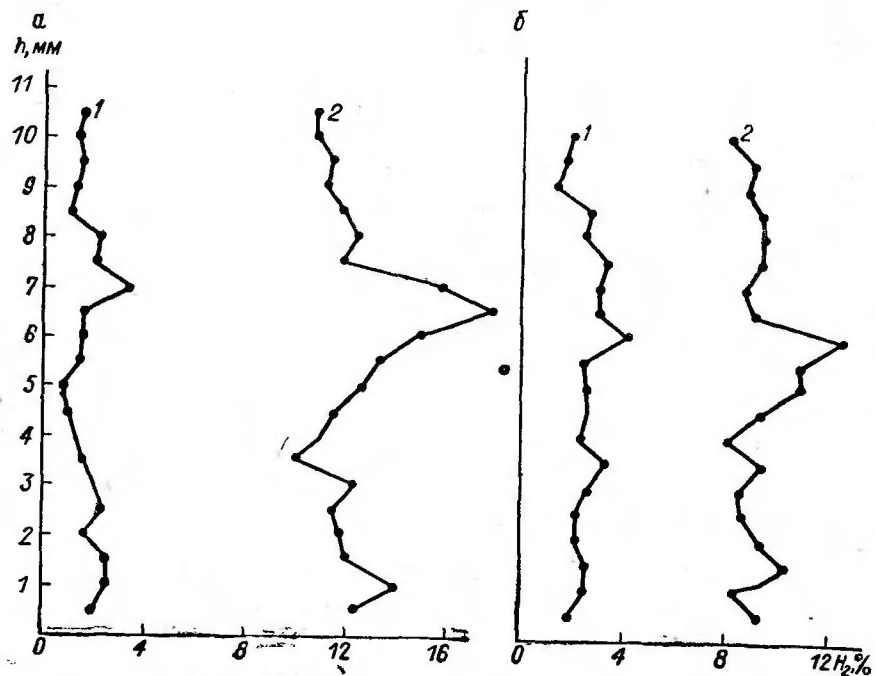


Рис. 20. Локальное распределение водорода по толщине шва.

мерное локальное распределение по сварному соединению. Анализ данных по распределению H_2 при сварке пластин из стали Ст3 и Х65 с содержанием микродобавок $V + Nb + Ti \geq 0,12\%$ показал, что наличие некоторых легирующих добавок приводит к небольшому повышению абсолютного содержания H_2 в металле шва.

Это следует связывать с возможностью образования химических соединений H_2 (гидридов V, Nb, Ti) и с наличием большого количества коллекторов в исследуемых сталях.

При применении целлюлозных электродов неравномерность распределения H_2 по сварному соединению выражена резче, чем в случае сварки фтористокальциевыми электродами. Это можно объяснить большой концентрацией в металле шва, выполненного

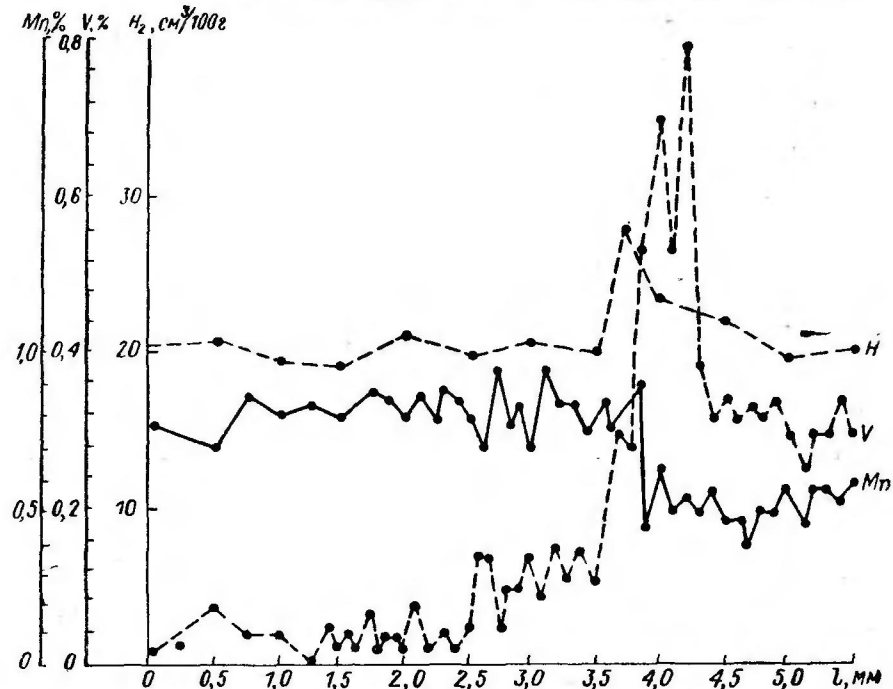


Рис. 21. Локальное распределение H, Mn и V по ширине сварного соединения (на уровне корневого слоя).

целлюлозными электродами, микронесплошностей, неметаллических включений и т. д. (рис. 20). Распределение H_2 по сварному соединению неравномерно практически на всех участках шва, причем наибольшая неравномерность наблюдается вблизи линии сплавления на уровне корневого слоя, т. е. в той зоне, где образуется большинство холодных трещин при сварке труб из сталей, упрочненных дисперсоидами.

При сварке охлажденных пластин H_2 распределен по сварному соединению более неравномерно, чем при сварке нагретых. Среднее содержание H_2 по сечению шва (включая зону сплавления) в случае сварки целлюлозными электродами охлажденных пластин составляет $18,5 см^3/100 г$ при разбросе значений, равном 2,12, а при сварке пластин, нагретых до $150^\circ C$, среднее содержание составляет $7,4 см^3/100 г$ при дисперсии всего 1,08. Водород,

диффундируя в околошовную зону, может вызывать снижение деформационной способности металла, причем микроструктура околошовной зоны при этом имеет решающее значение, так как наличие даже больших «концентрационных пиков» H_2 по линии сплавления, например при сварке стали с $[C]_{э\text{кв}} \approx 0,3$, еще не свидетельствует о склонности стыков труб из этой стали к хрупкому разрушению.

Эффект неравномерного распределения H_2 по сварному соединению, по-видимому, усугубляется и неравномерностью распределения некоторых легирующих и микролегирующих элементов (рис. 21). Видно, что и Mn, и особенно V распределены неравномерно по сварному соединению. «Концентрационные пики» V достаточно четко согласуются с «концентрационными пиками» H_2 на расстоянии менее 0,5 мм от линии сплавления. На этом же расстоянии от линии сплавления оксисульфидные включения в сталях с микродобавками Ti, Nb и т. д. растворяются в аустените и при охлаждении выделяются в области границ первичных зерен в виде двумерной эвтектической пленки, разрушающей межзернистое сцепление.

По-видимому, подобная химическая неоднородность является одним из важнейших факторов, способствующих появлению трещин в непосредственной близости от линии сплавления при сварке труб из дисперсионноупрочненных сталей.

Роль сварочных материалов в обеспечении стойкости монтажных сварных соединений против холодных и кристаллизационных трещин

Проблема предотвращения образования трещин в зоне монтажного кольцевого стыка связана как с соблюдением определенных условий сборки (требуемая величина зазора, минимальное смещение кромок, применение внутренних центраторов, достижение соосности стыкуемых труб или плетей) и сварки (начальная температура, время между проходами, тип электродов, погонная энергия q/v и т. д.), так и с толщиной стенки трубы, ее диаметром, химическим составом и условиями производства трубной стали (кинетика раскисления, масса слитков, технология прокатки и т. д.). Однако все эти факторы в той или иной степени неизбежно связаны со сварочными материалами.

Наиболее серьезным дефектом монтажных кольцевых сварных соединений является образование холодных трещин, которые, как правило, зарождаются в корневом слое шва вблизи линии сплавления (вдоль линии или же под небольшим углом к ней). В некоторых специальных случаях возможно образование в корневом слое поперечных трещин.

Время появления холодных трещин может составлять от нескольких минут до нескольких недель после завершения сварки. Холодные трещины в соединениях труб, сваренных только корневым

слоем, могут иметь относительную протяженность до 65%. Протяженность трещин можно снизить до 0—6%, если в течение 3—5 мин после завершения сварки корневого слоя шва выполнить второй, «горячий», проход. Для замедления скорости охлаждения сварных соединений при сварке в условиях отрицательных температур рекомендуется выполнять первый проход одним сварщиком на длину не более 0,9 м. Подобные требования регламентированы, например, канадским стандартом. С понижением начальной температуры сварки (только первым слоем) труб диаметром 660, 4 мм из стали класса X60 целлюлозными электродами типа E6010 (AWS) относительная протяженность трещины увеличилась. При +21 °C трещин вообще не было, при +13 их уже было 13; при +4—34, а при -7 °C — 37% [17]. Отмечено также, что в случае сварки труб из стали с содержанием $C \geq 0,2\%$ чувствительность к образованию трещин при снижении температуры начала сварки от +20 до 0 °C гораздо выше, чем при снижении от 0 до -20 °C. Поскольку время до образования трещин обычно удлиняется с понижением температуры, подобное замедленное разрушение вполне логично связывать с диффузией H_2 .

Проблема образования «водородных» трещин при строительстве трубопроводов связана со следующими тенденциями.

1. Увеличение рабочего давления и увеличение диаметра трубопроводов. Оба эти обстоятельства служат причиной утолщения стенки трубы, а следовательно, и повышения скорости охлаждения сварного соединения. При этом из-за роста диаметра увеличивается время до выполнения второго слоя, что приводит к более неравномерному распределению H_2 с образованием резких «концентрационных пиков» вблизи линии сплавления.

2. Повышение степени легирования трубных сталей, что в первую очередь связано со сталями классов X60 и X65.

При всей многочисленности факторов, способствующих образованию «водородных» трещин, можно все же отметить, что этот механизм зависит главным образом от $H_{\text{пот}}$ сварочного материала, которым выполняется корневой слой шва, от толщины стенки трубы, условий прилегания внешних нагрузок и, наконец, времени до начала выполнения «горячего» прохода.

Сопrotивление образованию «закалочных» трещин в первую очередь связано со степенью закаливaемости свариваемых трубных сталей и всеми теми технологическими факторами, которые замедляют охлаждение, поддерживая ее для сталей класса X60 на уровне примерно 5 °C/сек при 300 °C (предварительный подогрев, определенная погонная энергия сварки и т. д.).

Поскольку многие факторы являются общими для образования как «водородных», так и «закалочных» трещин, вполне закономерно предположение, что холодные трещины при монтажной сварке стыков труб имеют комплексное «закалочно-водородное» происхождение. При этом небезынтересно отметить, что, например, предварительный подогрев уменьшает чувствительность к

трещинообразованию даже в том случае, когда он не изменяет *HV* зоны термического влияния, так как помимо снижения скорости охлаждения ниже интервала структурных превращений он способствует выравниванию распределения H_2 по сечению шва и ускоряет его диффузию из шва в интервале температур, в котором восприимчивость к «водородным» трещинам меньше, чем при комнатной температуре. Действие, аналогичное предварительному подогреву, оказывает и «горячий» проход, который должен выполняться не позднее чем через 3—5 мин после начала сварки первого слоя. Твердость и соответствующий ей тип микроструктуры монтажного сварного соединения труб при сварке корня шва типичными для трубопроводного строительства электродами показаны в табл. 41 и на рис. 22. Из табл. 41 и рис. 22 следует, что максимальные пики твердости ($HV > 350$) и преобладание в микроструктуре вблизи линии сплавления продуктов промежуточного (и мартенситного) распада аустенита наблюдается лишь при сварке целлюлозными электродами. Скоростные электроды ВСФС-50 занимают промежуточное положение между целлюлозными и традиционными фтористокальциевыми. Наблюдаемые пики твердости носят лишь временный характер при сварке стыков труб и «снимаются» при выполнении «горячего» прохода и наложения последующих слоев (рис. 23). Поэтому совместный эффект водорода и высокой твердости, свидетельствующей о локальной хрупкости и химической неоднородности сварного соединения, может привести к образованию холодных трещин лишь в случае нарушений технологии сборки и сварки. Следует отметить, что твердость вблизи линии сплавления $HV \geq 350$ является весьма условным критерием опасности образования холодных трещин, если не учитывать $H_{пот}$ сварочных материалов.

В настоящее время разработаны и применяются для практических целей многочисленные технологические пробы на холодные трещины, а также ряд машинных испытаний по методике МВТУ, ИМЕТ, метод вставок Гранжона и т. д. Использование метода вставок в сочетании с определением H_2 в расплавленном металле позволило получить зависимости между напряжением, при котором образуются трещины (Q), погонной энергией сварки и содержанием $H_{диф}$ в шве (табл. 42) [2].

Для стали второго типа (знаменатель), более чувствительной к закалке, чем сталь первого типа (числитель), величина напряжений, приводящих к образованию холодных трещин, резко снижается уже при повышении $H_{диф}$ на 0,6 см³/100 г. Таким образом, согласно этой пробе при сварке достаточно мягких сталей с $\sigma_T = 36$ кгс/мм² даже незначительное повышение содержания $H_{диф}$ может оказаться критическим (аналогично сталям с весьма ограниченной свариваемостью). Однако подобные жесткие условия не подтверждаются практикой трубопроводного строительства.

Анализируя табл. 43, можно заключить, что при применении методов сварки, позволяющих довести содержание $H_{диф}$ до

Таблица 41

Микроструктура (*M*) и твердость сварного соединения (сечение по корневому слою шва) при сварке тремя основными типами электродов (сварка корня шва в вертикальном положении, стыки труб из стали типа X60 размером 1420×17 мм)

Характеристика электрода			Металл шва		в непосредственной близости от линии сплавления		3ТВ	
Марка	D, мм	q/v, кал/см	Металл шва		в непосредственной близости от линии сплавления		близке к основному металлу	
			M	HV	M	HV	M	HV
ВСЦ-4А	4	4800—5000	C	260—290	C+Пр	290—370	C	240—270
			(Ф+П)	230—250	C	250—280	(Ф+П)	220—240
УОНИ-13/55	3	5300—5500	C+(Ф+П)	240—260	C+Пр	260—320	C+(Ф+П)	220—260
			(Ф+П)	230—250	C	240—260	(Ф+П)	210—230
ВСФС-50	4	5000—5200	C+(Ф+П)	240—270	C+Пр	280—300	C+(Ф+П)	230—260
			(Ф+П)	230—250	C	240—270	(Ф+П)	210—230

Примечания. 1. Тип шва — односторонний, сварен полностью; последующие слои шва выполнены автоматической сваркой под флюсом марки АН-22 проволокой Св-08ХМ D=3 мм. 2. Условное обозначение микроструктур: С — сорбитобразная; Пр — продукты промежуточного распада аустенита; (Ф+П) — ферритно-перлитная смесь.

минимума (сварка в среде $Ag + CO_2$ порошковой проволокой с фтористокальциевым наполнителем и сплошной проволокой), холодные трещины почти не образуются. Незначительное повышение

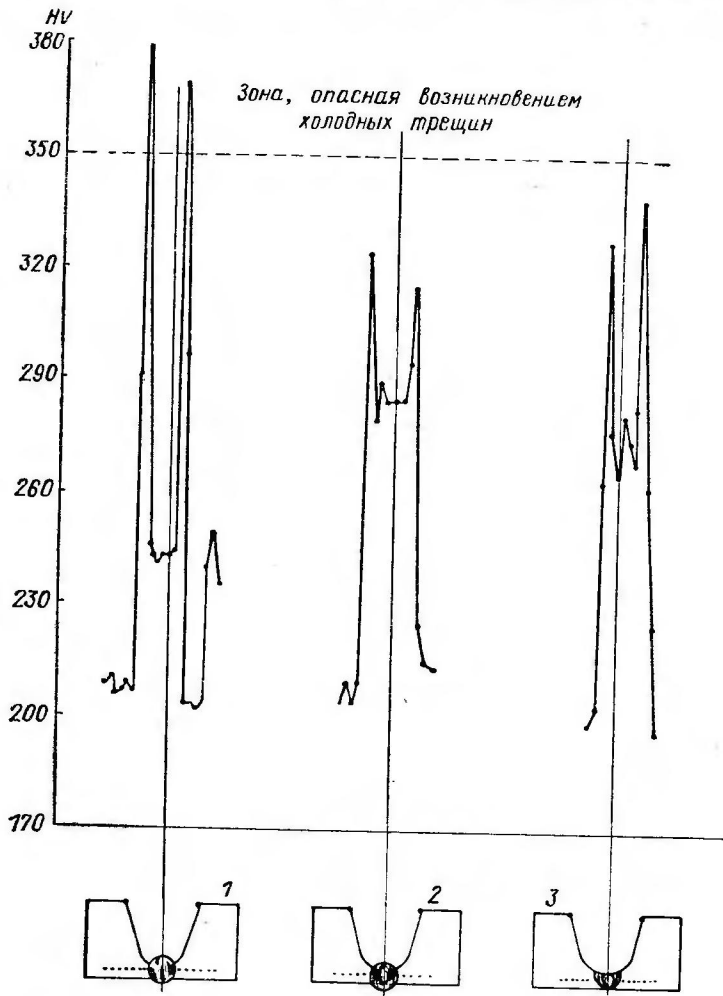


Рис. 22. Распределение твердости по сечению корневого слоя однослойных швов при сварке различными электродами.
1 — целлюлозными (ВСП-4А); 2 — фтористокальциевыми (УОНИ-13/55); 3 — фтористокальциевыми [для сварки сверху вниз (ВСФС-50)].

$H_{диф}$ даже при применении электродов фтористокальциевого типа либо при сварке порошковой проволокой с рутиловым наполнителем (даже с дополнительной газовой защитой) приводит к резкому снижению уровня напряжений, вызывающих образование трещин. Таким образом, подобная оценка влияния сварочных

материалов на склонность сварного соединения к трещинообразованию возможна лишь при непосредственной проверке в реальных условиях. Учитывать действие сварочного материала на склонность сварного соединения к трещинообразованию целесообразно по характерному для него уровню H_2 . Для одновременного учета (кроме химического состава трубных сталей) толщины стенки труб и уровня H_2 ВНИИСТ был предложен ориентировочный критерий оценки свариваемости (формула $[C]_{экр}$). Фирмой «Ниппон стил» проведена оценка точности выбора по существующим формулам $[C]_{экр}$ температуры предварительного подогрева и установлено, что формула ВНИИСТ является наиболее достоверной в случае сварки сталей классов Х60 и Х65 [30].

На рис. 24 представлены результаты испытания фтористокальциевых (1) и целлюлозных (2) электродов (сварка пластин толщиной 19 мм из стали класса Х65, содержащей, %: 0,104 С;

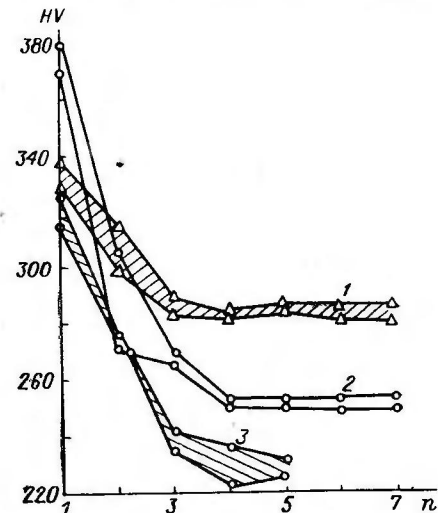


Рис. 23. Влияние числа слоев (n) в шве на максимальные значения твердости в зоне термического влияния корневого слоя шва при сварке различными электродами.

1 — ВСФС-50; 2 — ВСП-4А; 3 — УОНИ-13/55

Таблица 42

Зависимость между напряжением, [при котором образуются трещины, погонной энергией сварки и $H_{диф}$ металла шва (толщина пластин 20 мм)

q/v , кал/см	Q , кгс/мм ² , при $H_{диф}$, см ³ /100 г		
	3,1	3,7	4,1
3600	20	18	13
	10	8	—
4800	34	28	22
	20	14	—
6000	39	37	33
	30	20	—
7100	—	—	—
	38	26	—

Примечание. В числителе приводятся значения Q для стали, содержащей: 0,18С; 1,38Mn, 0,48Si; в знаменателе — содержащей: 0,25С; 1,49Mn; 0,48Si.

Таблица 43

Напряжения, при которых образуются трещины, для различных методов сварки; сталь содержит (%): 0,18C; 1,33Mn; 0,48Si

q/u, кал/см	Q, кгс/мм ²			
	Электроды фтористо-кальциевого типа	Порошковая проволока рутилового типа в среде Ag+CO ₂	Порошковая проволока фтористо-кальциевого типа в среде Ag+CO ₂	Сварка проволокой сплошного сечения в среде Ag+CO ₂
2400	8	7	—	28
3600	20	18	36	37
4800	34	30	—	—

1,29 Mn; 0,25 Si; 0,014 P; 0,006 S; 0,04 Nb; 0,06V; 0,03 Cu) на пробе «Теккен», которая весьма близко имитирует реальное монтажное стыковое соединение. Сварка проводилась электродами одного диаметра (4 мм), при одном I_{св} (170 а) и одинаковой v_{св} (15 см/мин),

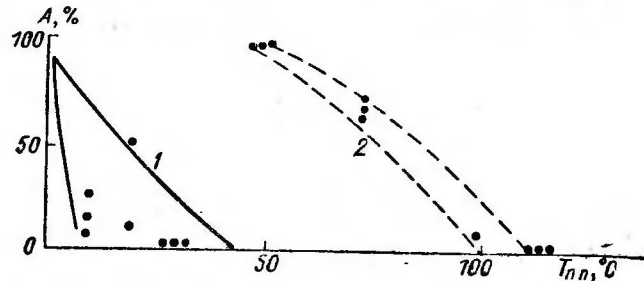


Рис. 24. Результаты оценки образования холодных трещин (А) в зависимости от температуры предварительного подогрева (T_п, п) пластин стали X65 (проба «Теккен»).

что практически исключало различие в значениях погонной энергии. Из рис. 25 следует, что для получения сварного соединения без трещин в случае сварки целлюлозными электродами с H₂ = 30 см³/100 г начальная температура сварки должна быть 120 °C, а при сварке фтористокальциевыми электродами с H₂ = 4 см³/100 г — всего 45 °C.

Таким образом, стойкость сварных соединений против «водородных» трещин для целлюлозных электродов (в соответствии с пробой «Теккен») примерно в 2,5 раза ниже, чем для фтористокальциевых.

Машинная проба на тавровых образцах показала (по данным В. Ф. Чабукина), что для фтористокальциевых электродов, прокаленных при 350 °C, величина минимально допустимого напряжения (σ_{р min}) в среднем составляет 40 кгс/мм², а для

целлюлозных — 20 кгс/мм². Таким образом, стойкость сварных соединений против холодных трещин для целлюлозных электродов по результатам испытаний в ряде случаев достаточно точно отражает фактическую тенденцию.

Следует учитывать, что склонность сварных соединений к образованию холодных трещин при сварке фтористокальциевыми электродами в значительной мере зависит от влажности электродного покрытия, т. е. от уровня Н_{пот} покрытия, величина которого не является постоянной: она выше в начале сварки, когда электрод еще не нагрелся, и уменьшается к концу плавления электрода. Поэтому при сварке труб из стали X60 и особенно X65 рекомендуется варить «горячими» фтористокальциевыми электродами, прокаленными на месте проведения работ непосредственно перед сваркой при 350—450 °C в течение 1,0—1,5 ч.

Образование горячих трещин при сварке в трубопроводном строительстве не является широко распространенным дефектом, однако существует вероятность их появления при неблагоприятных условиях. При этом стойкость сварных соединений против кристаллизационных трещин определяется в основном температурным интервалом хрупкости металла, его пластичностью в этом интервале и темпом деформации металла. В случае горячих трещин объективную информацию можно получить, применяя различные машинные испытания при сварке пластин встык. В табл. 44 для ряда сварочных материалов приведены значения стойкости сварного соединения против образования горячих трещин. В качестве критерия используется скорость деформации до образования трещин. Чем выше А_{кр}(v_{кр}), тем выше стойкость сварного соединения против образования горячих трещин. Для целлюлозных электродов характерны значения 2,6—3,1 мм/мин, а для фтористокаль-

Таблица 44

Сопротивление металла шва образованию горячих трещин в зависимости от типа сварочных материалов и основного металла

Марка электрода	Покрытие	Критическая скорость деформации А _{кр} , мм/мин	
		Сталь 17ГС	Сталь X65
ВЦ-4 Fox Cel Fleetweld 5P ВЦ-4А Fox Cel Mo УОНИ-13/45 УОНИ-13/55 ВЦФ-60	Целлюлозно	3,20—3,40	3,2—3,5
		3,00—3,30	3,20—3,40
		3,30—3,50	3,30—3,50
	Фтористокальциевое	3,40—3,60	3,55—3,75
		3,45—3,90	3,55—3,95
		4,10—4,30	4,20—4,50
Schwarz-3K		4,30—4,55	—
		4,55—4,80	4,75—4,90
		4,60—4,90	4,80—4,90

цивых 3,5—4,1 мм/мин. Более высокие значения $A_{кр}$ для фтористокальциевых электродов можно объяснить лучшим десульфидирующим действием основных шлаков в сравнении с рутиловыми, а также лучшим соотношением Mn/S и Mn/S и, как следствие, более высоким содержанием MnS в составе сульфидной фазы.

Из табл. 44 следует также, что трубные стали, упрочненные дисперсоидами, в случае как целлюлозных, так и фтористокальциевых электродов имеют несколько более высокие значения $A_{кр}$, чем традиционные трубные стали типа 17ГС. Подобное повышение стойкости против образования горячих трещин, по-видимому, связано с отмеченным выше модифицирующим действием микродобавок (V, Nb и др.) на форму сульфидной фазы.

При анализе влияния сварочных материалов на обеспечение эксплуатационной надежности сварных соединений, в частности в коррозионно-активных средах, многие исследователи отмечают существенное влияние химического состава металла на интенсивность коррозионного разрушения. Обычно указывают на необходимость ограничения содержания С и Mn. Известно и такое требование: $Mn/C \approx 3$.

В табл. 45 дан итог исследований влияния на коррозионную стойкость металла 12 химических элементов, встречающихся в основном металле труб. По-видимому, эти закономерности правильны также при выборе системы легирования металла шва, и из их рассмотрения можно сделать следующие выводы.

1. Карбонитридообразующие микродобавки, встречающиеся в трубных сталях (V, Al, Ti), не способствуют или даже препятствуют коррозионному растрескиванию. По влиянию С, Мо и Cr существуют различные мнения.

2. Си способствует коррозионному растрескиванию, а Si повышает сопротивление ему, однако исследования по влиянию данных элементов, по-видимому, недостаточны.

Таблица 45

Влияние химических элементов, характерных для трубопроводных сталей, на чувствительность металла к коррозионному растрескиванию под напряжением в среде влажного H_2S [(+) — не вызывает; (—) — вызывает коррозионное растрескивание].

Исследователи	C	Mn	Cu	Mo	Cr	Ni	Ti	V	Al	B	Zr	Si
Волдмер и Боуер	—	—		+		—	+					
Фрейзер	+	—		—		—	+					
Макглассон	+	—		—	+	—						
Бэдди	—	—		+		—						
Либхен	+	—		—		—						
Герцог	—	—	—	+	+	—	+	+	+	+		
Баспи	—	—	—	+	—	—	+	+	+	+		
Хорикова	+	—	—	+	—	—	+	+	+	+		
Клиер				+	+	—	+	+	+	+	—	+

3. Все исследователи единодушно отмечают отрицательное влияние Mn и Ni, в том числе и на стойкость сварных швов. Так, например, при автоматической сварке под флюсом проволокой с содержанием Ni 0,58—3,02% установлено, что чем больше в металле шва Ni, тем ниже предельное растрескивающее напряжение. Уже при 0,6% Ni предельное растрескивающее напряжение уменьшилось на 20%.

При выборе сварочных материалов для сварки корневого слоя шва, контактирующего с коррозионно-активным газом, целесообразно руководствоваться следующими соображениями: а) со-

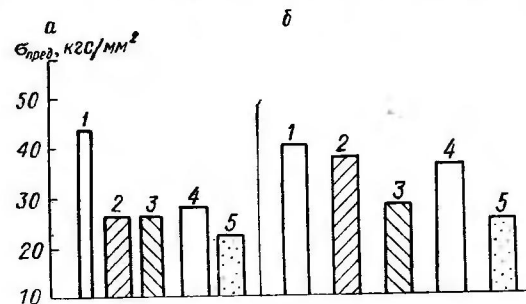


Рис. 25. Влияние способа сварки сталей с двумя уровнями прочности (а — $\sigma_B = 80$ кгс/мм²; б — $\sigma_B = 50$ кгс/мм²) на сопротивление сварного соединения коррозионному растрескиванию.

1 — основной металл; зона термического влияния: 2 — при ручной сварке, 3 — при автоматической сварке под флюсом; металл шва: 4 — при ручной сварке, 5 — при автоматической сварке.

держание в присадочном металле Mn и Ni должно быть по возможности минимальным; б) сварной шов должен обладать высокой деформационной способностью, в частности высоким δ_B ; в) даже незначительная пористость корневого слоя шва совершенно недопустима; г) прочностные характеристики шва, в частности σ_B и σ_T , следует поддерживать на уровне по крайней мере не выше 40 и 50 кгс/мм² соответственно.

На рис. 25 приведено сравнение коррозионной стойкости металла шва при ручной сварке штучными электродами и при автоматической сварке под флюсом. Из приведенных данных можно сделать следующие выводы.

1. Чем выше σ_B стали, тем в большей степени повышается чувствительность к коррозионному растрескиванию как зоны термического влияния, так и металла шва. Так, например, для варианта ручной сварки при $\sigma_B = 80$ кгс/мм² предельное напряжение в ЗТВ 26 кгс/мм², а при $\sigma_B = 50$ кгс/мм² уже 38 кгс/мм².

2. Стойкость шва при автоматической сварке под флюсом существенно ниже, чем при ручной. Следовательно, при прочих равных условиях, по-видимому, более эффективен контакт с коррозионно-активным газом металла, наплавленного штучными электродами соответствующего химического состава и механических характеристик.

Выбор сварочных материалов для швов, работающих в условиях возможной сероводородной коррозии, тесно связан с проблемой водорода. На внутренней поверхности металла трубы и корневого слоя шва происходит адсорбция и хемсорбция водорода, схематически представленная на рис. 26. График показывает, что максимальное содержание адсорбированного поверхностного H_2 (8—9 $см^3/100$ г) приходится на температуры, близкие к комнатным. В то же время установлено, что максимальная склонность к растрескиванию под действием H_2S наблюдается при 30—40 °С. Таким образом, температура максимальной адсорбции H_2 на поверхности и температура максимальной чувствительности к сероводородному растрескиванию практически совпадают.

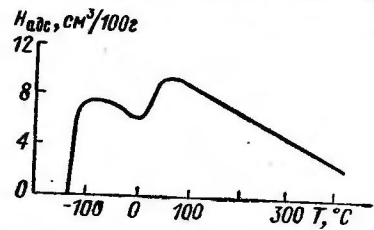


Рис. 26. Влияние температуры на адсорбцию водорода поверхностью стали (по данным Смиттелса).

Одновременно на металлической поверхности может происходить разложение гидратов типа A_mH_n с образованием атомарного H_2 . При этом образовавшаяся пленка Fe_mS_n тормозит процессы ассоциации атомов H_2 в молекулы и диффузия атомарного H_2 в металле ускоряется. Соединения типа Fe_mS_n имеют максимальную стабильность при температурах, близких к комнатным. Гидратообразующие элементы 5 и 6 групп периодической системы Менделеева также ускоряют адсорбцию H_2 на поверхности трубы.

Путем выбора соответствующего химического состава присадочного металла, по-видимому, возможно направлять процессы адсорбции и хемсорбции H_2 , а также «сглаживать» один из важных факторов диффузии H_2 — его концентрационный перепад. Если на поверхности адсорбировано 8—9 $см^3/100$ г H_2 , а уровень $H_{ост}$ в металле шва составляет 4—6 (сварка фтористокальциевыми электродами) и 10—13 $см^3/100$ г (сварка целлолозными электродами), то диффузия в шов должна произойти лишь в случае фтористокальциевых электродов, а в случае целлолозных более вероятно диффузия в ЗТВ, где уровень H_2 , как правило, не превышает 4—5 $см^3/100$ г, или в основной металл трубы, где уровень H_2 обычно ниже 1 $см^3/100$ г. Однако и в случае диффузии H_2 в металл шва ее активность также зависит от металлургического типа сварочных материалов.

Были определены коэффициенты диффузии H_2 для трех типов электродных покрытий [28] (табл. 46). Полученные данные вполне согласуются с имеющимися сведениями о том, что металл, наплавленный электродами с фтористокальциевым покрытием, меньше загрязнен неметаллическими включениями, вредными примесями и т. д., а поэтому в меньшей степени, чем в других случаях, «тормозит» диффузию H_2 .

Таблица 46

Параметры диффузии H_2 для различных электродных покрытий

Электродное покрытие	Коэффициент диффузии H_2 , $см^2/сек$	Энергия активации диффузии H_2 , ккал/г·атом
Фтористокальциевое	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \pm 1,5$
Рутитовое	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \pm 1,5$
Руднокислое	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \pm 0,7$

Сварочные материалы также влияют на усталостную прочность металла шва, поскольку химический состав металла во многом определяет его структурное состояние и механические характеристики. Для оценки влияния химического состава металла некоторыми авторами введено понятие «усталостного $[C]_{экр}$ », который рассчитывали по формуле

$$[C]_{экр}^{уст} = \sum \frac{ат. \text{ масса углерода}}{ат. \text{ масса элемента}} \times \text{масса элемента} \%.$$

В табл. 47 приведены необходимые для расчета данные.

Таблица 47

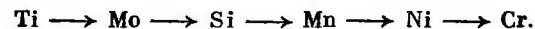
Данные для расчета $[C]_{экр}^{уст}$

Элемент	C	Mn	Si	V	Ni	Mo	Cr	Cu
Атомная масса	12	55	28	51	59	96	52	64
Атомная доля	1	0,218	0,429	0,235	0,203	0,125	0,231	0,188

Степень влияния химического состава на усталостную прочность можно определить по эмпирической формуле

$$\pm \sigma_w = 17 \pm [C]_{экр}^{уст}.$$

Экспериментально установлено, что элементы, входящие в состав стали, в частности в состав металла шва, при сварке стыков труб по эффекту повышения усталостной прочности можно расположить в следующий убывающий ряд:



Следовательно, при выборе сварочных материалов для сварки сталей, для которых необходимо поддерживать определенную усталостную прочность, наиболее благоприятно использовать легирование шва Mo, раскисление сварочной ванны Ti и, наоборот, избегать легирование шва Cr и, в меньшей степени, Ni.

Установлено, что долговечность сварных швов (при практически одинаковой площади дефектов в изломе), сваренных автома-

тическим способом под флюсом, существенно выше, чем сваренных вручную. При этом сварка под флюсом АН-22 в сочетании с проволокой Св-08ХМ обеспечивает наиболее высокую долговечность сварных соединений. Долговечность при разрушении образцов по ЗТВ [$N = (60,1 \div 60,3) \times 10^6$] составляет всего лишь около 20% от долговечности образцов, разрушившихся по основному металлу [$N = (281,9 \div 311,4) \cdot 10^6$].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше было показано, что современные сварочные материалы должны прежде всего обеспечить получение металла шва кольцевых монтажных стыков труб заданного состава и свойств. При всех рассмотренных способах электродуговой сварки это достигается путем изоляции расплавленного металла от воздуха газами и шлаками, образующимися в зоне сварки, а также раскислением и, в ряде случаев, легированием металла за счет соответствующих присадок, вносимых в сварочную ванну при расплавлении электродной проволоки либо электродного покрытия (флюса, заполнителя порошковой проволоки).

Наряду с металлургической обработкой сварочной ванны от свойств сварочных материалов зависят также другие аспекты сварочного процесса (горение дуги, плавление электродного и основного металла, кристаллизация и формирование металла и шлака и др.), которые определяют сварочно-технологические свойства: универсальность, пригодность для сварки «на спуск», проплавливающее действие, внешний вид шва, производительность сварки и т. д.

Кроме того, было показано, что свариваемость трубных сталей также во многом определяется свойствами сварочных материалов: уровнем $H_{пот}$, содержанием других газов, а также S и P в металле шва, характером диффузионных процессов вблизи линии сплавления и т. п. В зависимости от этих факторов при сварке конкретных трубных сталей достигается определенное сопротивление старению, образованию холодных и горячих трещин и т. д.

Таким образом, чтобы удовлетворить столь разнообразным требованиям, предъявляемым к монтажным сварным соединениям труб и к особенностям их выполнения в различных условиях и при использовании разнообразных сварочных процессов, необходимо иметь широкую номенклатуру высококачественных сварочных материалов с различными металлургическими и технологическими свойствами.

Поскольку в трубопроводном строительстве постоянно повышается уровень механизации сварочно-монтажных работ, особое значение приобретает разработка новых флюсов, прогрессивных газовых смесей и омедненных проволок для автоматической сварки поворотных и неповоротных стыков труб. Эти сварочные материалы, а также самозащитные порошковые проволоки должны в первую очередь обладать улучшенными сварочно-технологическими

свойствами, а их ассортимент должен быть строго регламентирован в соответствии с определенной группой трубных сталей, классифицированных по их прочностным характеристикам.

Наряду с развитием механизации сварочно-монтажных работ, в ближайшие годы сохранится ведущее значение электродов для ручной электродуговой сварки. Можно предположить, что в трубопроводном строительстве развитие электродного производства будет идти в следующих направлениях: создание нормального ряда унифицированных марок целлюлозных и фтористокальциевых электродов с улучшенными сварочно-технологическими свойствами; углубление исследований в области разработки скоростных электродов с фтористокальциевыми покрытиями, обеспечивающих при сварке «на спуск» гарантированное проплавление корня шва; создание влагостойких сварочных электродов, не требующих сушки перед сваркой и особых условий хранения.

ПРИЛОЖЕНИЕ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, УПОМЯНУТЫЕ В ДАННОЙ КНИГЕ И СТРАНЫ-ИЗГОТОВИТЕЛИ

Электроды

Австрия:	СССР:	ФРГ:
Fox Cel	АНО-4	Phoenix Cel 70
Fox Cel 85	АНП-2	Phoenix Cel 80
Fox Cel 90	ВСП-3	Schwarz-3K
Fox Cel Mo	ВСП-50	SH-120K
Fox EV-47	ВСФ-60	SH Gelb T
Fox EV-50	ВСФ-65	SH Grün K-50
Fox EV-63	ВСФ-75	SH Kupfer
Fox EV-70	ВСФС-50	SH Kupfer 1K
Fox KE	ВСФС-65	SH Kupfer K
	ВСП-4	SH Silber 62K
	ВСП-4A	SHV-1
Англия:	MP-3	
Ferron-20	МЭЗ-04	ЧССР:
LN	ОЗС-4	ВН-48
	ОЗС-6	
ГДР:	УОНИ-13/45	
Garant	УОНИ-13/55	Швеция:
Perfect	ЦЛ-2	Elga PL
	ЦМ-7	OK-46P
	ЦП-1/55	OK-55P
Голландия:	США:	OK-Tensitrod
Philips-31		
Philips-36		
Италия:	Ductilend-70	Япония:
Citoflex	Fleetweld 5P	Нитецу-16
Citoflex-55	Shield Arc 85	Нитецу-Н1 СО-600
Novocitobasico	Shield Arc-90B	Нитецу L-60
	Tensilend-70	Нитецу L-60S
РСР:		Нитецу N-12
Nibaz	СФРЮ:	L-62
Nibaz-65	ЕВВ-50	L-70

Проволоки

Бельгия:	СССР:	ФРГ:
T30Mo	Св-08Г2СМ	Fluxofil-11
	Св-08ГА	Fluxofil-31
ГДР:	Св-08ГМ	Fluxofil-35
10 Mn 4	Св-08МХ	Mo V2
K8 Mn 2	Св-08ФХМФА	PS2
Zis-547	Св-08ХГМС	PS2 CrMo
ПНР:	Св-08ХМ	PS2 Mo
Sp-16Al	Св-08ХНФ	PS2 Ni
	Св-10Г2	PS3
СССР:	Св-10ГА	PS3 Mo
ПВС-1	Св-10НМ	PS Ni Mo
ПВС-1Л	Св-10ХГ2СМА	S1
ПВС-3	Св-12М	S2
ПН1ДСК	ЭПС-15	ЧССР:
ПН2ДСК	США:	A0
ПНАН-1	AIS 118620	A1
ПНАН-3	Argosarc-51	A2
ПНАН-4	E-16	A3
ПНАН-7	E-60S3	Швейцария:
ПНАН-8	E-70S	S1
ПНАН-10	E-70SG	S2 Mo
Св-08	NR-200	S3 Mo
Св-08А	NR-216	Швеция:
Св-08АА	NR-236	OK Autrod 12.40
Св-08Г2С	S1	
	S2 Mo	
	S3 Mo	

Флюсы*

Австрия:	СССР:	ЧССР:
ВВ-3 (п)	АН-20С (п)	VUZ-4BaF (п)
	АН-22 (п)	VUZ-34Mn (п)
Бельгия:	АН-43 (п)	VUZ-42 Mn (к)
Arcosite B-5 (К)	АН-60 (п)	VUZ-152 (п)
Arcosite B-8 (К)	АН-348 (п)	Швейцария:
Arcosite D-34 (а)	АН-348А (п)	OP40TT (к)
Arcosite D-35 (а)	АНК-30 (к)	OP140TT (к)
	ВСКФ-60 (к)	Швеция:
ГДР:	КВС-19 (к)	OKFlux 10.60 (а)
PiE 18UP (п)	США:	Япония:
	Grau H (п)	FF-56 (к)
Голландия:	Grau L (п)	FF-59 (к)
No 90 (п)	H-100 (к)	FF-60 (к)
No 220 (п)	ФРГ:	
ПНР:	UV-420 (к)	
TAST-4 (п)	ЧССР:	
СССР:	VUZ-1H (п)	
АН-10 (п)	VUZ-2BaF (п)	
АН-17M (п)		

* а — аггломерированные; к — керамические; п — плавные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венгжин Я. Свойства стальных низкоуглеродистых сварных швов, выполненных автоматической сваркой под флюсами основного и нейтрального типов. — В кн.: Сварочные флюсы и шлаки. Киев, «Наукова думка», 1974, с. 75—91.
2. Гранжон А., Леруа А. Исследование условий образования холодных трещин при сварке сталей. — В кн.: Науч. проблемы сварки и спец. электрометаллургии. Ч. III. Киев, «Наукова думка», 1970, с. 49—60.
3. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. М., «Машиностроение», 1973, 448 с.
4. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. Киев, «Техника», 1970. 186 с.
5. Любавский К. В. Металлургия сварки плавлением. — В кн.: Справочник по сварке. Т. I. Под ред. Е. В. Соколова. М., Машгиз, 1960, с. 51—140.
6. Мусияченко В. Ф., Миходуй Л. И. Уменьшение влажности флюсов для сварки высокопрочных низколегированных флюсов. — «Авт. сварка», 1972, № 5, с. 75—76.
7. Петров Г. Л. Сварочные материалы. Л., «Машиностроение», 1972. 280 с.
8. Підгаєцький В. В. Пори, включення і тріщини в зварних швах. Київ, «Техніка», 1970. 176 с.
9. Подгаецкий В. В., Парфесса Г. И., Лейначук Е. И. Процессы образования сульфидов в металле шва. — «Авт. сварка», 1971, № 1, с. 5—10.
10. Походня И. К. Газы в сварных швах. М., «Машиностроение», 1972. 256 с.
11. Сеферян Д. Металлургия сварки. Пер. с франц. М., «Машиностроение», 1963. 347 с.
12. Тарлинский В. Д., Лосев Ю. Ф. Сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов в СССР и за рубежом. М., ВНИИЭгазпром, 1970. 70 с.
13. Фролов В. В. Поведение водорода при сварке плавлением. М., «Машиностроение», 1966. 154 с.
14. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. М., Металлургиядат, 1961. 422 с.
15. Vennet A. Utilisation basic fluxes. — «Met. Constr. and Brit. weld Journ.», 1970, № 12, p. 523—527.
16. Bertling A. American statistics avaries at pipe-line (1950—1966). — «Techn. Überwach», 1968, № 8, p. 261—265.
17. Blomberg R., Corderoy D. Factors effected the hydrogen content of weld deposit. — «Weld. Fabr. and Design», № 11, p. 35—40.
18. Charikawa O. Corrosion tests of steels into hydrosulfuric gaz. — «Koutzurjoku», 1968, № 6, p. 16—35.
19. L'Effect des inclusions de laitier sur la Resistance à la fatigue des

oints soudées bout à bout et usines. — «Le soudage dans le monde», 1969, 7, № 4, p. 3—16.

20. Folkhard E., Ablasser F., Widowitz H. Neuentwicklung auf dem Gebiet der Pipelineschweißung. — «Berg und Hüttenmännischen Monatsheft», 1969, № 11, p. 6.

21. Gurney T., Smith G. Fatigue tests on $1\frac{1}{2}$ in thick transverse butt welds containing slag inclusion — «Brit. weld. journ.», 1967, 14, № 1, p. 17—38.

22. Hart H., Watkinson F., Backer R. Hydrogen-induced delayed cracking in the welding of pipe-line. — Rep. Conf JJW, Jondon, 1968, p. 302—314.

23. Hrivňák I. A study of the system Fe — V — C — N — «Czechosl. journ. phys.», 1969, 19, № 8, p. 987—1002.

24. Hümmitsch W. Über die Metallurgie des Schutzgasschweißens von Baustählen — «Praktiker», 1971, № 2, p. 34—48.

25. Jsaο M., Takeshi Ch. Chemical analyses on blow-holes. — «Esetzy qannaisi», 1970, 39, № 10 p. 1075 — 1083.

26. Коснас̆ L., Horvat S. Пластификаторы для электродного производства. — «Zvaranie», 1963, 12, № 8, p. 226—229.

27. Nakamura Ch., Jnagaki M. Hydrogen-induced delayed cracking in steels. — «Esetzy gakkaisi», 1969, 38, № 9, p. 14—25.

28. Odegard O., Evans G., Christensen K. Diffusion of hydrogen through weld metal at covered electrodes. — «Met. const. and Brit. weld. jour.», 1971, № 2, p. 11—19.

29. Watson L. Effect electrode characteristics on economic efficiency process arc welding. — «Weld. and met. fabr.», 1967, № 9, p. 261—266.

30. Weldability of API X65 pipe-line — «Bull. Nippon steel corporation», 1971, Nov. p. 1—15.

31. Winderton K. Welding at low temperatures. Theory and practice. — «Rep. Nat. Ass. of corrosion Engineers», Calgary, Canada, 1971, p. 73—86.

32. Zeke j. Possibilities of guntative classification of metallurgical characteristics — Doc. JJW XHIA—96—74, Bratislava, May 1974, p. 43.