

*Гарри Тчубоу  
Инженер-механик,  
Директор Отдела сварки  
Компания TECHINT S.A., Аргентина*

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГАЗОПРОВОДОВ**

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящий документ касается преимуществ использования сварки порошковой самозащитной проволокой при строительстве газопровода Loma de la Lata компанией Techint S.A. в Аргентине в 1987 году. На основе опыта, полученного при проведении работ, произведен сравнительный анализ сварки порошковой проволокой с традиционным методом сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием. Автор полагает, что компания Techint S.A. является первой в Латинской Америке фирмой, применившей самозащитную порошковую проволоку при строительстве газопровода.

Документ состоит из трех основных частей:

1. Первая часть вкратце описывает собственно процесс сварки и некоторые аспекты обучения сварщиков.
2. Вторая часть касается некоторых деталей применявшейся сварочной технологии, ее квалификационных испытаний и внедрения в практическую работу.
3. Третья часть посвящена техническим и экономическим преимуществам, явившимся результатом применения самозащитной порошковой проволоки для выполнения данной работы. Здесь, так же, проводится сравнение некоторых аспектов сварки порошковой проволокой с аналогичными показателями, характерными для традиционной сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием.

Ниже указаны основные технические и конструкционные показатели трубопровода Loma de la Lata, принадлежащего компании GAS DEL ESTADO:

Общая длина трубопровода: 1358 км

Разделен на три потока:

Поток I 593 км, 114 из которых были построены с применением порошковой проволоки,  
Поток II 631 км, целиком построены с применением порошковой проволоки,  
Поток III 134 км, построены с применением традиционного метода сварки штучными электродами.

Таким образом, технология сварки всего трубопровода позволила практически проанализировать и сравнить два сварочных метода.

|                                     |  |   |
|-------------------------------------|--|---|
| Диаметры труб:                      | 24" (609,6 мм)<br>30" (762 мм)<br>36" (914,4 мм) | 5 км<br>686 км<br>667 км                                    |
| Толщины стенок труб:                | диаметр 24"<br>диаметр 30"<br>диаметр 36"        | 8,7 - 12,7 мм<br>7,9 - 8,7 - 9,5 мм<br>9,5 - 10,3 - 15,8 мм |
| Классификация материала труб:       | диаметры 24" - 30"<br>диаметры 30" - 36"         | API 5L Gr. X52 (K46)<br>API 5L Gr. X60 (K52)                |
| Испытательное давление:             |  | 90 кг/см <sup>2</sup>                                       |
| Рабочее давление:                   |  | 60 кг/см <sup>2</sup>                                       |
| Максимальный объем транспортировки: |  | 26 000 000 м <sup>3</sup> /день                             |

## **I. ДУГОВАЯ СВАРКА САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ**

### **I.1. Краткое описание использованного оборудования и материалов**

Сварка самозащитной порошковой проволокой - это полуавтоматический процесс, не требующий внешней газовой защиты сварочной ванны. В соответствии со стандартом AWS A3.0 процесс обозначен (классифицирован) как FCAW = Flux Cored Arc Welding (Дуговая сварка порошковой проволокой). Впервые этот процесс был разработан американской компанией, The Lincoln Electric Company, и представлен на рынок под торговой маркой Innershield. Поскольку процесс FCAW (Дуговая сварка порошковой проволокой), так же, предполагает применение дополнительной внешней газовой защиты сварочной ванны, сам термин FCAW может привести к путанице. С целью ее исключения в настоящем документе дополнительно используется термин "Самозащитная" (Self-Shielded), применительно к виду сварки порошковой проволокой. не требующей дополнительной внешней газовой защиты.

Сварка самозащитной порошковой проволокой выполняется от источников питания с жесткой внешней характеристикой в комбинации с механизмами подачи проволоки. Комплект оборудования, в целом, сходен с применяющимся для обычной полуавтоматической сварки сплошной проволокой в среде защитных газов. При выполнении данного проекта были использованы автономные дизельные агрегаты SAM-400 в комбинации с мобильными механизмами подачи сварочной проволоки LN-23P с полупроводниковой системой контроля производства компании Линкольн Электрик. Аппараты LN-23P обеспечивают возможность управления скоростью подачи проволоки переключателем, смонтированным на сварочной горелке, не требуя прерывания сварки и регулировки этого параметра от источника.

С другой стороны, используемое для этого процесса оборудование, весьма схоже с тем что применяется для выполнения обычной сварки сплошной проволокой в среде защитных газов. Механизм подачи подключается к источнику питания, поставляющему необходимый электрический ток, проволока подается из бухты, закрепленной на механизме подачи. Сварочный ток подводится к проволоке через закрепленный в горелке контактный наконечник. При контакте проволоки со свариваемой деталью дуга инициируется спонтанно.

Использованная система питания обладает характерной особенностью: она поддерживает постоянство напряжения на сварочной дуге в процессе сварки в диапазоне  $\pm 0,5$  В, таким образом обеспечивая высокую стабильность горения дуги. Эта особенность очень важна для процесса сварки самозащитной порошковой проволокой, так как колебания напряжения на дуге  $\pm 1$  В и более неблагоприятно влияют на качество наплавляемого металла.

Конструкция применяемой сварочной горелки позволяет вести сварку во всех пространственных положениях, аналогично сварке штучным электродом, благодаря небольшому весу и мобильности. Кроме того, на горелке установлен двухпозиционный переключатель: в первом положении сварка ведется при предварительно установленных величинах сварочного напряжения и скорости подачи проволоки; при переключении во второе положение скорость подачи проволоки понижается примерно на 20%. Такая особенность очень удобна, особенно при сварке стыков трубопровода, где необходимо вести сварку по переменному профилю с постепенным переходом в потолочное положение.

Применявшийся для данной работы сварочный материал представлял из себя порошковую проволоку, флюс которой содержит различные компоненты, в частности газообразующие компоненты, противодействующие вредному влиянию окружающей атмосферы на сварочную ванну и свойства дуги. Характерная особенность процесса наплавки - восстановление порядка 1% алюминия в металле шва, что обеспечивает контроль уровня кислорода и азота, и, следовательно, сплошность металла наплавки. Образуя говоря, по причине отсутствия внешних защитных газов можно считать порошковую проволоку ручным покрытым электродом, "вывернутым наизнанку".

При строительстве трубопровода подрядчик использовал самозащитную порошковую проволоку марки Innershield NR-207, соответствующую классификации E71T8-K6 стандарта AWS A5.29-80 и позволяющую вести сварку во всех пространственных положениях, включая сварку на спуск (3G и 5G). Проволока выполняет наплавку низкоуглеродистой стали, содержащей 0,85% никеля и 1% алюминия.

Будучи свободной от необходимости внешней газовой защиты сварочной ванны, неизбежной для традиционного полуавтоматического процесса сварки, порошковая самозащитная проволока очень привлекательна для пользователя и может применяться там, где ранее было возможным лишь использование штучных покрытых электродов, например в условиях ветра, в особенности вне помещений. Более того, оборудование, необходимое для выполнения сварки порошковой самозащитной проволокой, проще и более удобно в эксплуатации, по сравнению с классическим набором оборудования, необходимым для полуавтоматической сварки сплошной проволокой в среде защитных газов - оно не требует наличия баллонов, содержащих защитный газ, и соответствующих аксессуаров: газопроводных шлангов, вентиляей, регуляторов, газовых насадок и расходомеров.

## **I.2. Обучение сварщиков**

Каждый сварщик, допущенный к программе обучения сварке порошковой самозащитной проволокой, должен был удовлетворять следующим требованиям:

- а) не иметь специализации по сварке штучными электродами;
- б) иметь опыт работы с полуавтоматическим сварочным оборудованием;
- в) быть не старше 35 лет.

Обучение выполнялось на рабочем полигоне компании Techint S.A. в г. Канюелас. Применявшееся для тренировки сварщиков оборудование состояло из 6 мотор-генераторов SAM-400 производства Линкольн Электрик, в комбинации с механизмами подачи проволоки LN-23P. В качестве сварочного материала была использована самозащитная порошковая проволока Innershield NR-207 диаметром 2,0 мм. Все тренировочные швы были выполнены на трубах диаметром 30" (762 мм) с толщиной стенки 8,7 мм. Класс трубы по API 5L X60.

Процесс обучения и тренировки сварщиков включал сварку на спуск кольцевых швов катушек - по полукольцу, от позиции 12:00 до позиции 6:00, на одного обучаемого. Основной целью обучения было достижение правильной синхронизации между скоростью сварки (параметр, контролируемый движением руки сварщика) и скоростью подачи проволоки (предварительно установленный и контролируемый оборудованием параметр). Такая синхронизация имеет большое значение, особенно при выполнении горячего прохода поверх корневого шва, выполненного самозащитной порошковой проволокой. Необходимо исключить прожоги на корневом шве, при том что их вероятность довольно высока, так как толщина такого корня невелика, а плотность тока при сварке порошковой проволокой довольно высока - 240-260 Ампер на диаметр 2,0 мм.

Другим аспектом обучения было приобретение сварщиками необходимых навыков для правильного выполнения ре-стартов и заварки кратеров на облицовочных швах стыка, внешний вид которых удовлетворяет требованиям основного стандарта для магистральных трубопроводов API 1104.

Общее время, затраченное на обучение сварщиков, прошедших квалификационные испытания заказчика - компании Газ Дэль Эстадо, составило 20 рабочих дней.

## **II. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ**

### **II.1. Предварительные соображения**

Проанализировав различные варианты применения самозащитной порошковой проволоки, было решено использовать ее в составе комбинированной технологии, в соответствии с которой только корень шва

выполняется штучными электродами с целлюлозным покрытием, а все остальные слои стыка завариваются с помощью самозащитной порошковой проволоки.

Причина такого выбора - скорость сварки корневого слоя. При строительстве магистрального трубопровода скорость продвижения всей строительной бригады является главным параметром, влияющим на производительность, и определяется, главным образом, скоростью сварки первого слоя шва - корневого. Были проведены практические испытания применения для выполнения корневого слоя обоих процессов сварки на спуск - ручными покрытыми электродами и самозащитной порошковой проволокой. При этом замерялось время, необходимое для сварки корня шва. В результате было установлено, что сварка корневого прохода ручными покрытыми электродами требует меньшего времени, чем сварка корня самозащитной порошковой проволокой.

Причиной меньшей скорости полуавтоматической сварки корня шва порошковой проволоки можно считать недостаточную квалификацию сварщиков, однако объективным фактором, замедляющим скорость сварки, является необходимость установки большего зазора кромок под сварку, как это показано на Рис. 1, и, следовательно, большее время для его перекрытия. Другой причиной более быстрой сварки корня штучными электродами является возможность работы более чем двух сварщиков одновременно. Фактически, для сварки корня штучными электродами шва можно использовать трех сварщиков, работающих одновременно, что невозможно при работе с порошковой проволокой.

## **II.2. Разработка и квалификация технологии сварки**

Испытания сварочной технологии производились в условиях, имитирующих реальные условия работы на трассе, в частности, выдерживалось существующее в действительности расстояние нижней поверхности трубы от земли, применялся тот же метод подготовки свариваемых кромок и центровки стыка (внутренний пневматический центратор), а так же метод зачистки швов. Для сварки тестовых стыков были задействованы два сварщика - по одному с каждой стороны. После сварки корневого слоя потребовалась лишь поверхностная его зачистка для отделения образовавшегося шлака. Незначительность зачистки определялась двумя факторами:

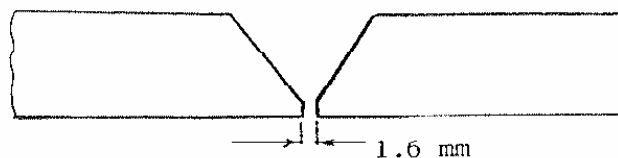
- а) Желанием сохранить как можно большую толщину первого (корневого) слоя для избежания возникновения прожогов при выполнении горячего прохода порошковой проволокой;
- б) Высокой концентрацией энергии сварочной дуги при работе порошковой проволокой, которая способна полностью удалить шлаковые включения, оставшиеся в корневом слое и, таким образом, исключает необходимость тщательной его зачистки.

Необходимо отметить, что после сварки корневого слоя штучными электродами с целлюлозным покрытием (класса E6010) остаются шлаковые включения вдоль обеих сторон сварного шва, так называемые "карманы" (Рис. 2). Технология сварки самозащитной порошковой проволокой (Рис. 3) предполагает лишь незначительную зачистку вершины корневого шва (Рис. 3а). Шлаковые включения на сторонах сварного шва (Рис. 2) были удалены при выполнении горячего прохода самозащитной порошковой проволокой благодаря характерной для нее высокой степени проплавления.

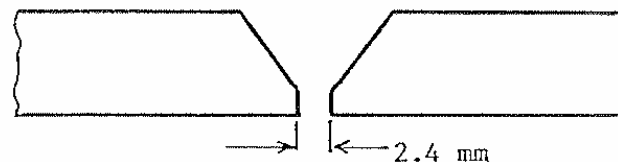
Если бы второй (горячий) проход должен был выполняться штучными электродами - зачистку нужно было бы выполнять значительно более тщательно для удаления любых остатков шлака (Рис. 4б), как это требуется технологией сварки стыка только штучными электродами. В этом случае, для достижения приемлемой чистоты шва должен быть удален довольно значительный объем корня шва, причем необходимо осуществить выборку абразивным кругом "карманов", расположенных глубже поверхности разделки с обеих сторон шва (Рис. 2).

При выполнении горячего прохода поверх недостаточно тщательно зачищенного корневого шва, выполненного штучными электродами класса E6010, остаются сварочные дефекты в форме тонких ниточных шлаковых включений по краям корневого шва, называемые "карманами" и хорошо видимые на рентгеновской пленке.

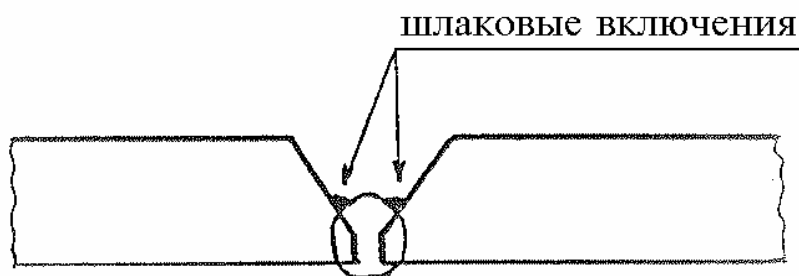
### (a) СВАРКА ШТУЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ



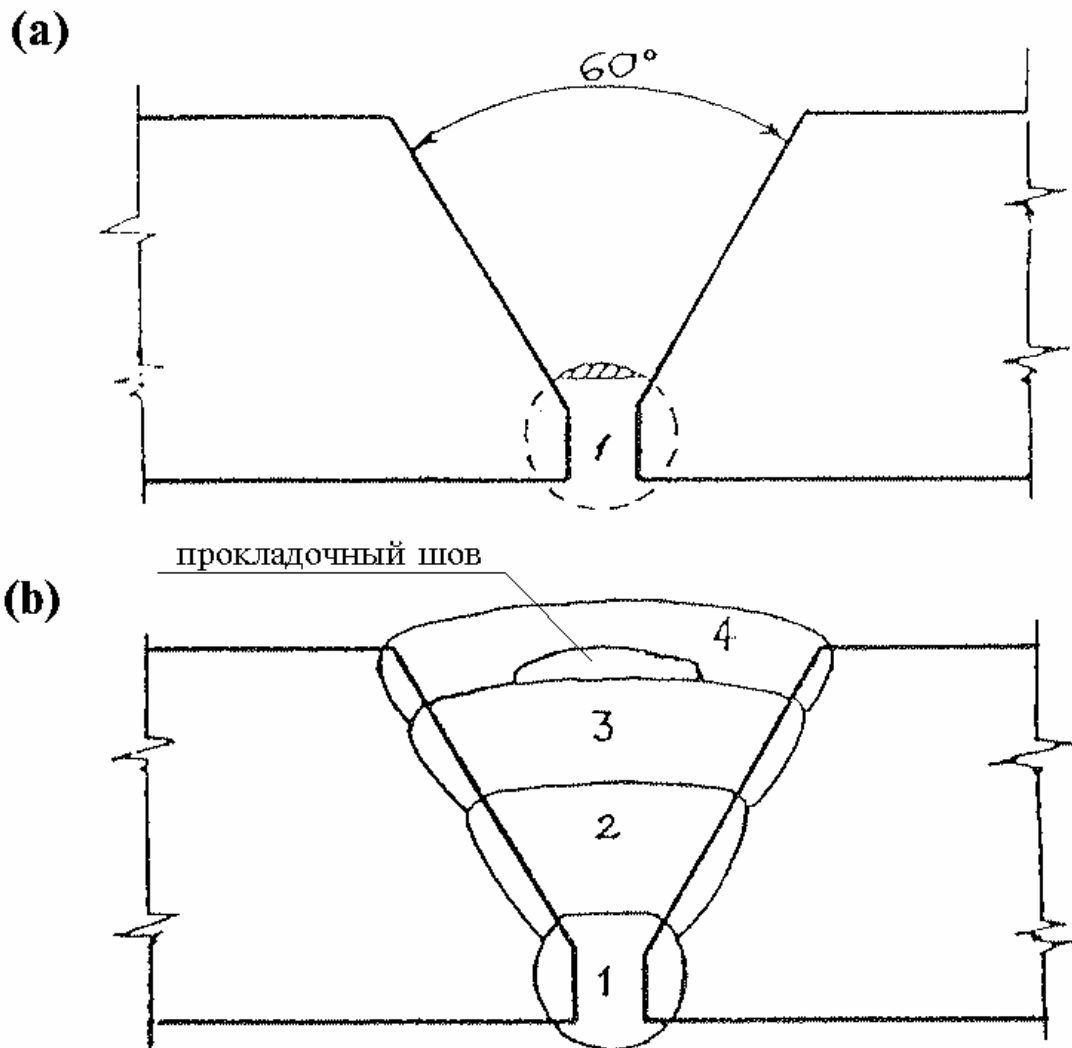
### (b) СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ



**Рис. 1** Зазор в разделке, требуемый технологией сварки корня шва (а) штучными электродами с целлюлозным покрытием, и (б) самозащитной порошковой проволокой.

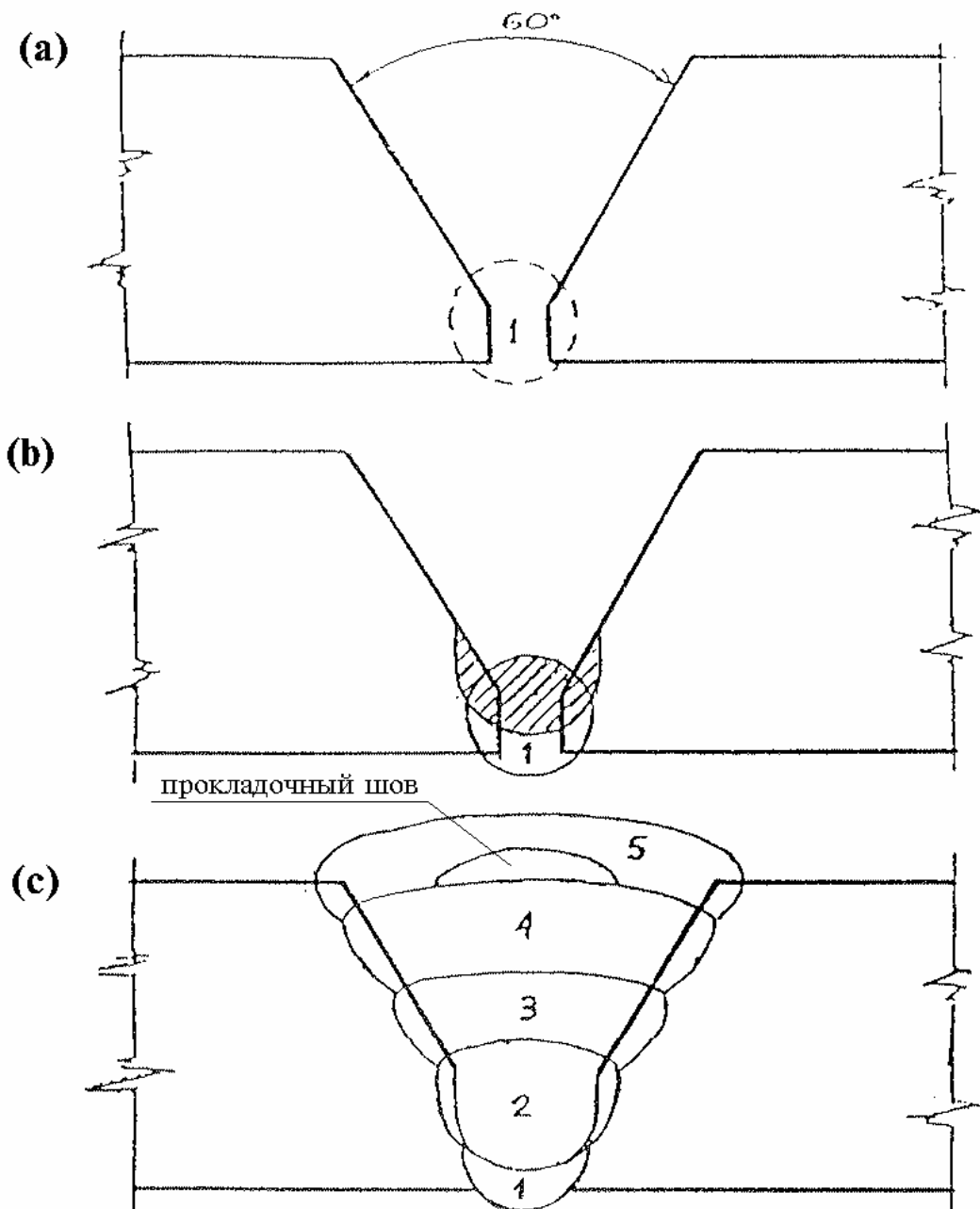


**Рис. 2** Шлаковые включения, образующиеся по краям корневого шва при сварке штучными электродами с целлюлозным покрытием. Недостаточно тщательная зачистка корневого шва может повлечь возникновение сварочных дефектов - "карманов" - при выполнении горячего прохода электродами того же типа.



**Рис. 3** Разделка кромок и количество проходов в соответствии с комбинированной технологией сварки стыка:

- (a) Корневой (первый) проход выполняется штучными электродами с целлюлозным покрытием класса E6010. Заштрихованная область - небольшой объем металла, удаляемый при незначительной зачистке корня шва.
- (b) Заполняющие проходы (2, 3 и 4) выполняются самозащитной порошковой проволокой марки Innershield NR-207. После третьего прохода для достижения правильного формирования облицовочного шва (четвертого прохода) накладываются "прокладочные" швы между позициями 2-4 и 10-8 часов.



**Рис. 4** Разделка кромок и количество проходов в соответствии с технологией сварки стыка штучными электродами:

- (a) Корневой (первый) проход выполняется штучными электродами с целлюлозным покрытием класса E6010.
- (b) Необходимо произвести тщательную зачистку корневого шва и кромок разделки для выборки шлаковых включений (см. Рис.2).
- (c) Заполняющие проходы (2, 3, 4 и 5) выполняются с помощью штучных электродов с целлюлозным покрытием класса E7010-A1. После четвертого прохода необходимо наложить "прокладочный" шов между позициями 2-4 и 10-8 часов для достижения правильного формирования облицовочного шва.

Как показано на Рис. 3, в соответствии с принятой технологией сварки самозащитной порошковой проволокой после незначительной зачистки корневого шва выполняется горячий проход, причем сплошность шва гарантируется при зачистке корневого слоя проволоочной круговой электрошметкой. Третий

(заполняющий) проход выполняется между позициями 1:00-5:00 и 11:00-7:00 часов, поскольку горячий проход обеспечивает наплавку достаточного объема металла в позициях 12:00 и 6:00. В некоторых случаях чтобы устранить недостаток наплавки металла заполняющим проходом (проходами) на вертикальных участках стыка перед выполнением облицовочного шва необходимо наплавить “прокладочные” швы между позициями 2:00-4:00 и 10:00-8:00 часов. Этим достигается постоянство глубины и высоты усиления облицовочного шва.

После завершения сварки и зачистки сварного шва проводилась визуальная его инспекция с последующим рентгенографическим исследованием. Был произведен выбор используемой рентгеновской пленки, сваренный стык размечен под вырезку необходимого количества (16) образцов в соответствии с требованиями стандарта API 1104.

В соответствии с требованиями, предъявленными заказчиком работ - фирмой Газ дель Эстадо - и для повышения надежности проводимых испытаний количество образцов, вырезаемых для проведения испытаний на изгиб и излом было изменено:

|   | <u>Требования API 1104</u> | <u>Требования Газ дель Эстадо</u> |
|---|----------------------------|-----------------------------------|
| Испытания на прочность                  | 4 образца                  | 4 образца                         |
| Испытания наружной части шва на изгиб   | 4 образца                  | 6 образцов                        |
| Испытания внутренней части шва на изгиб | 4 образца                  | 0 (корень - E6010)                |
| Испытания на излом образца с надрезом   | 4 образца                  | 6 образцов                        |
| <b>ВСЕГО:</b>                           | <b>16 образцов</b>         | <b>16 образцов</b>                |

### **II.3. Применение самозащитной порошковой проволоки на практике**

В процессе выполнения квалификационных испытаний технологии сварки самозащитной порошковой проволокой было замерено время, необходимое для сварки каждого прохода. На основе этих данных было рассчитано количество сварщиков, необходимое для выполнения того или иного прохода в трассовых условиях. В качестве критерия расчета было избрано условие, чтобы все следующие за корневым и горячим проходами заполняющие швы отстояли друг от друга не более чем на одну секцию трубопровода (Рис. 5). Такой критерий сильно отличается от традиционного расположения сварочных бригад при сварке стыков ручными покрытыми электродами, где группа сварщиков, выполняющих корневой и горячий (№2) проходы, может быть отделена от остальных сварщиков, выполняющих заполнение и облицовку, значительной дистанцией (Рис. 6), иногда превышающей 3 км.

| Номер прохода | Сварочный материал     | Количество сварщиков |          |
|---------------|------------------------|----------------------|----------|
|               |                        | Действующие          | Запасные |
| 1             | Штучный электрод E6010 | 3                    | 1        |
| 2             | Порошковая проволока   | 4                    | 1        |
| 3             | Порошковая проволока   | 4                    | 1        |
| 4             | Порошковая проволока   | 6                    |          |
| <b>ВСЕГО:</b> |                        | <b>20</b>            |          |

**Таблица 1.** *Количество сварщиков, необходимое для сварки в трассовых условиях по технологии с преобладанием процесса сварки самозащитной порошковой проволокой.*



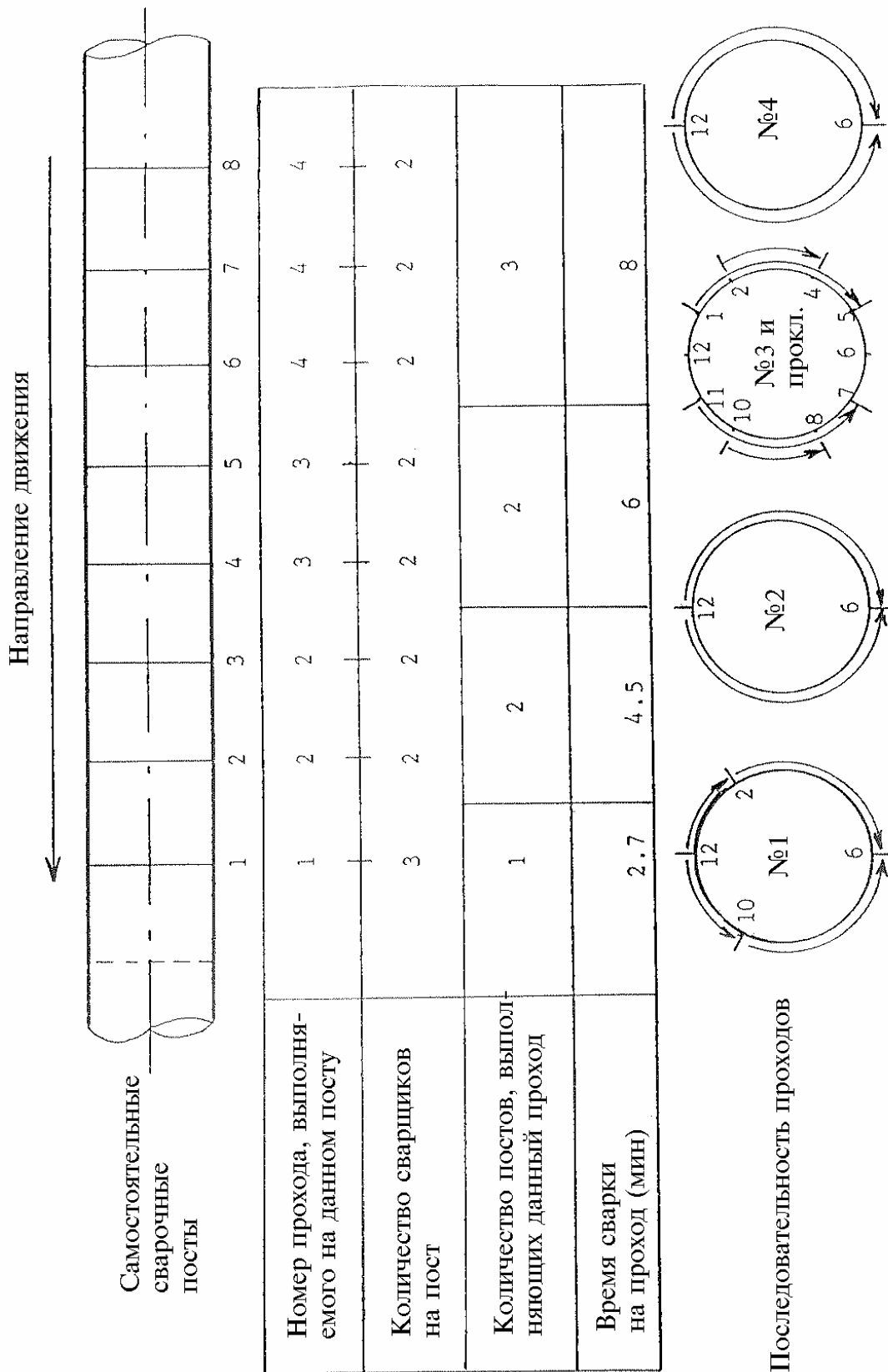
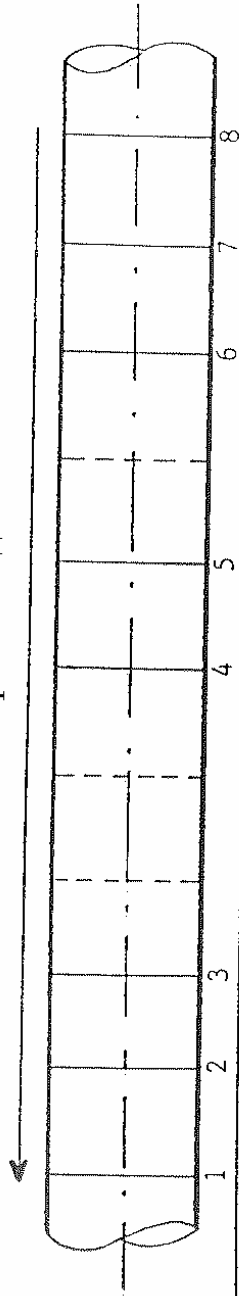


Рис. 5 Расположение сварочных постов и распределение сварщиков на трассе при выполнении работ по технологии сварки самозащитной порошковой проволокой заполняющих слоев стыка (Поз. 2, 3 и 4).

Направление движения

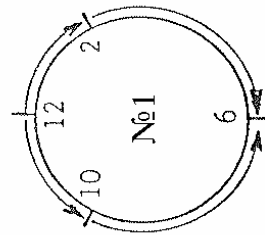


Самостоятельные  
сварочные  
посты

|  |     |   |   |    |    |    |    |    |
|--|-----|---|---|----|----|----|----|----|
| Номер прохода, выполняемого на данном посту  | 1   | 2 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| Количество сварщиков на данном посту         | 3   | 2 | 2 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Количество постов, выполняющих данный проход | 1   | 1 | 1 | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  |
| Время сварки на проход (мин)                 | 3.5 | 3 | 4 | 14 | 16 | 16 | 16 | 16 |

≈ 700 м

≈ 1500 м



Последовательность  
проходов

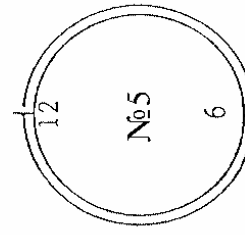
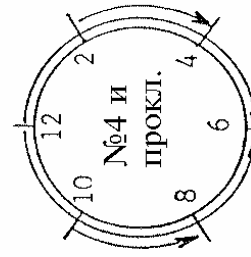
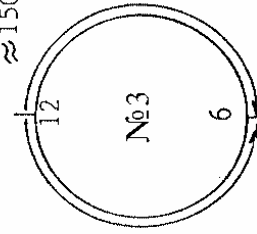
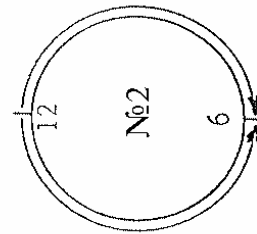


Рис. 6 Расположение сварочных постов и распределение сварщиков на трассе при использовании метода сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием для выполнения всего стыка: корневой шов - электродами типа Е6010, остальные проходы - электродами типа Е7010-А1.

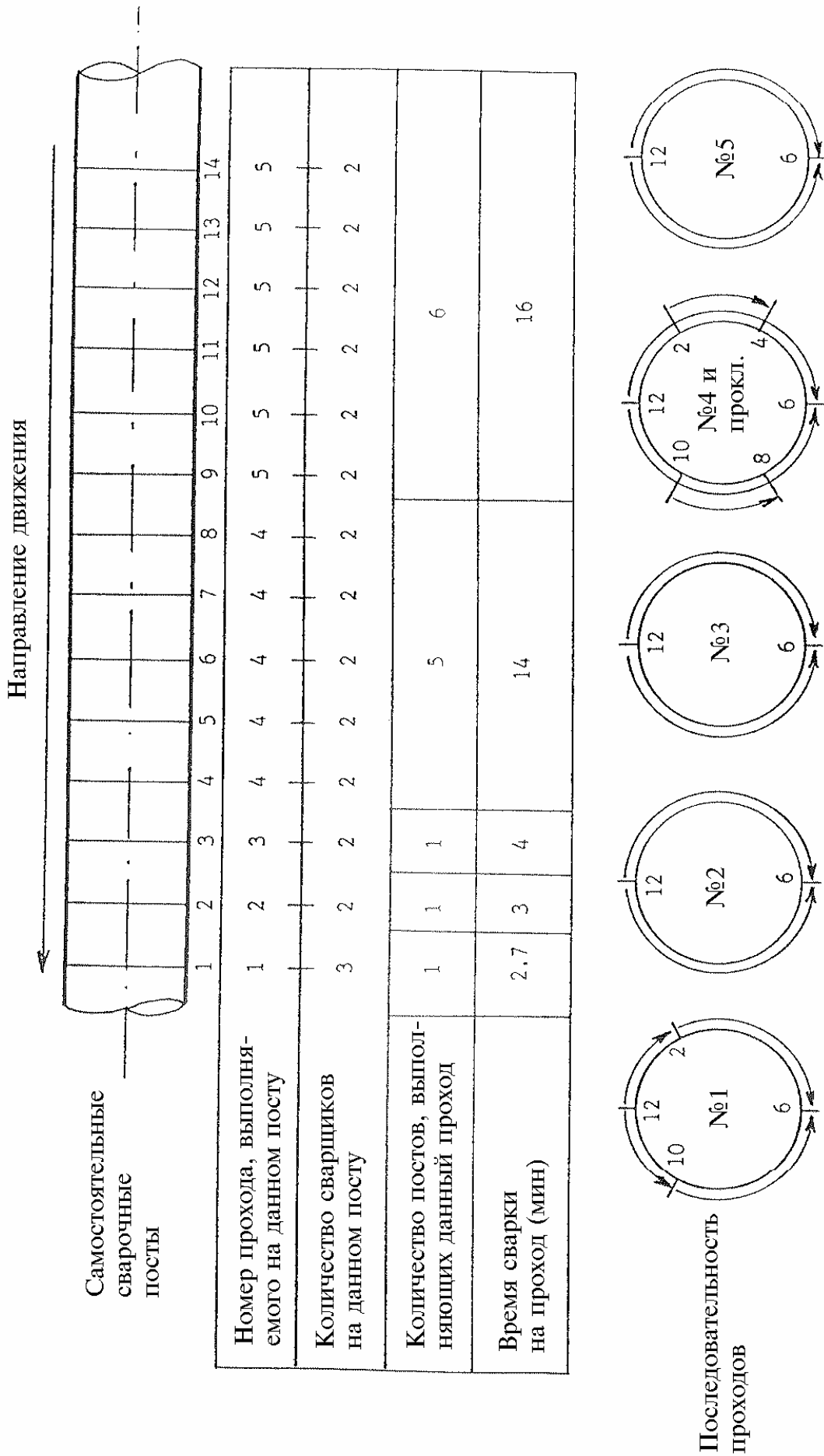


Рис. 7 Расположение сварочных постов и распределение сварщиков, которое потребовалось бы для достижения производительности, свойственной технологии сварки самозащитной порошковой проволокой (схема работ изображена на Рис. 5), при использовании традиционного метода сварки стыков стержнями электродами с целлюлозным покрытием.

Таблица 1 показывает, что общее количество сварщиков, требуемое для выполнения работы в соответствии с принятым критерием, равняется 20, среди которых:

- 17 сварщиков являются основными,
- 3 сварщика - в запасе, и
- 14 сварщиков заняты на сварке порошковой проволокой.

Как показано на Рис. 5, три сварщика работали одновременно, заваривая корень шва (Пост №1). При распределении людей по остальным постам, лишь два сварщика требовалось на каждый из них и при общем количестве 8 постов (см. Рис. 5) требовалось следующее количество людей:

|                        |                                |              |
|------------------------|--------------------------------|--------------|
| Проход №1 (корень)     | - требуется 1 сварочный пост:  | 3 сварщика,  |
| Проход №2 (горячий)    | - требуется 2 сварочных поста: | 4 сварщика,  |
| Проход №3 (заполнение) | - требуется 2 сварочных поста: | 4 сварщика,  |
| Проход №4 (облицовка)  | - требуется 3 сварочных поста: | 6 сварщиков. |

При такой организации работ, а так же при хороших погодных условиях и состоянии почвы, в течение 10-часового рабочего дня вся бригада выполняла 200 стыков, 10% из которых подвергались радиографическому контролю.

Опыт применения самозащитной порошковой проволоки на трассе продемонстрировал два ее неоспоримых преимущества:

- а) При выполнении работ в дни с резкими порывистыми ветрами руководство было вынуждено временно приостанавливать сварку корневого слоя штучными электродами, в то время как заполнение и облицовка порошковой проволокой продолжала вестись без срывов благодаря отличной защищенности процесса сварки от ветра.
- б) Сварные швы, выполнены самозащитной порошковой проволокой, отличались высоким качеством, подтверждаемым рентгеновским контролем. Было продемонстрировано практически, что подавляющее количество возникших дефектов обнаружено в корне шва. Таким образом, если корневой шов не содержал дефектов, заполняющие и облицовочные слои в основном не ухудшали качества всего сварного соединения. Этот факт доказывает высокую надежность работы порошковой проволокой.

### **III. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ**

#### **III.1. Сравнительный анализ технических особенностей процессов сварки штучными покрытыми электродами и самозащитной порошковой проволокой.**

##### **Рабочие характеристики**

При сварке штучными покрытыми электродами сварщик контролирует два основных параметра:

- (а) длину сварочной дуги, т.е. расстояние между свариваемой деталью и расходуемым электродом - это главный параметр, и
- (б) скорость движения сварочной дуги, т.е. скорость сварки - вторичный параметр.

Такой двойной контроль процесса сварки требует от сварщика специальных навыков и координации. Для получения аналогичного качества шва при выполнении полуавтоматической сварки требуется меньше навыков и сноровки, поскольку наиболее сложный параметр процесса - длина дуги - контролируется оборудованием. Соответственно, качество сварного соединения в меньшей степени зависит от состояния сварщика.

Кроме того, процесс обучения и адаптации сварщиков к различным материалам, используемым при полуавтоматической сварке, происходит быстрее и проще по причине отсутствия необходимости в контроле

длины дуги. Высокая плотность энергии обеспечивает хорошее плавление основного металла, что важно при сварке в несколько проходов, когда существует вероятность недостаточно тщательной зачистки шлака на предыдущем слое. Поскольку проволочный электрод не имеет наружной обмазки, толщина которой может незначительно варьироваться вдоль длины штучного электрода, дуга при полуавтоматической сварке не требует большого внимания.

Полуавтоматическая сварка самозащитной порошковой проволокой не требует дополнительной газовой защиты сварочной ванны, что упрощает практическое применение процесса.

### **Некоторые металлургические аспекты**

Порошковая самозащитная проволока Innershield NR-207 обеспечивает наплавку металла, схожего по свойствам с наплавкой штучными электродами с целлюлозным покрытием класса E7010-A1. Однако, существует заметная разница в уровне содержания диффузионного водорода. Порошковая проволока абсорбирует очень небольшое количество влаги. Штучный же электрод с целлюлозным покрытием фактически нуждается в определенном минимальном количестве влаги в обмазке для обеспечения удовлетворительных сварочных свойств. Как показано в Таблице 2, уровень диффузионного водорода, содержащегося в наплавленном порошковой проволокой металле шва, сравним с аналогичным показателем для штучных электродов с основным типом покрытия класса E7018. Таким образом, металл, наплавляемый электродами с целлюлозным покрытием, содержит в 10 раз больший объем диффузионного водорода.

| Материал,<br>используемый для наплавки           | Содержание диффузионного<br>водорода, мл/100 г |
|--|--|
| Порошковая проволока Innershield NR-207          | 3,6  |
| Электрод с основным покрытием класса E7018       | 4,0  |
| Электрод с целлюлозным покрытием класса E7010-A1 | 50   |

**Таблица 2.** Средние показатели содержания диффузионного водорода в металле шва, определенные для различных сварочных материалов.

Ударная вязкость является важным показателем механических свойств сварного соединения, определяющим его способность сопротивляться хрупкому разрушению. В Таблице 3 указаны данные по уровням ударной вязкости, полученные при температуре -29°C (-20°F). Как видно из таблицы, ударная вязкость металла, наплавленного самозащитной порошковой проволокой, в два раза превышает аналогичный показатель для штучного электрода с целлюлозным покрытием, и в 1,5 раза - с основным.

| Материал,<br>используемый для наплавки           | Ударная вязкость<br>при -29°C (-20°F), Дж |
|--|---|
| Порошковая проволока Innershield NR-207          | 161                                       |
| Электрод с основным покрытием класса E7018       | 100                                       |
| Электрод с целлюлозным покрытием класса E7010-A1 | 78,6                                      |

**Таблица 3.** Средние показатели ударной вязкости металла шва (Шарпи-тест).

Поскольку сварка самозащитной порошковой проволокой является полуавтоматическим процессом, время горения дуги зависит только от сварщика, выполняющего работу, и никак не зависит от длины сварочного электрода - как это происходит в случае сварки штучными покрытыми электродами. При полуавтоматической сварке сварщик гасит дугу если его положение становится неудобным для продолжения наплавки и он вынужден изменить свою позицию. Следовательно, время горения дуги в этом случае больше чем время, затрачиваемое на расходование одного 350-миллиметрового покрытого

электрода. Таким образом, полуавтоматическая сварка сокращает число остановок работы, уменьшает количество ре-стартов сварного шва и, как следствие, количество связанных с этим дефектов.

Радиографическое исследование продемонстрировало высокое качество сварных швов, выполненных полуавтоматической сваркой самозащитной порошковой проволокой. В значительной степени на это влияет

отличное проплавление, обеспечиваемое порошковой проволокой. Несплавы и шлаковые включения являются крайне редко встречаемыми в подобных швах дефектами.

И, наконец, швы, выполненные самозащитной порошковой проволокой Innershield NR-207, имеют лучший внешний вид по сравнению со швами, полученными при сварке целлюлозными электродами класса E7010-A1 - характерная для порошковой проволоки ребристость поверхности шва более однообразна.

### **Расход сварочного материала**

Особенностью сварки порошковой проволокой является более эффективная по сравнению со сваркой штучными электродами пропорция между общим объемом сварочного материала, используемого для выполнения наплавки, и объемом фактически наплавленного металла (отношение последнего к первому обычно называют коэффициентом наплавки того или иного метода сварки). Проведенные для изучения данного аспекта испытания дали следующие результаты:

- а) для штучного электрода класса E7010-A1 диаметром 5,0 мм коэффициент наплавки составил 50%;
- б) для самозащитной порошковой проволоки NR-207 диаметром 2,0 мм коэффициент наплавки составил 82%.

Эти цифры означают, что порошковая проволока фактически наплавляет на 32% больше металла, чем тот же объем штучных покрытых электродов. Соответственно, как видно из Рис. 3 и 4, для сварки стыка труб толщиной порядка 10 мм самозащитной порошковой проволокой требуется меньшее число проходов, чем для сварки того же стыка штучными покрытыми электродами.

## **III.2. Оценка экономической эффективности**

Решение о применении самозащитной порошковой проволоки было принято для достижения нескольких целей:

- понизить общие затраты на строительство трубопровода,
- достичь высокого качества сварных швов,
- получить эти преимущества при минимальных затратах рабочей силы.

Экономический анализ, предлагаемый ниже, доказывает, что инвестиции, вложенные в самозащитную порошковую проволоку, были оправданы.

Экономия средств явилась результатом следующих фактов:

- а) понижение объема сварочного персонала,
- б) понижение общего числа единиц сварочного оборудования - как следствие (а),
- в) понижение требуемого объема сварочных материалов,
- г) понижение требуемого объема зачистных дисков,
- д) понижение объема ремонтных работ.

Выполненный анализ сравнивает экономические показатели, характерные для двух независимых потоков строительства трубопровода Loma de la Lata:

Поток II: длина 632 км, использованный сварочный материал - самозащитная порошковая проволока Innershield NR-207 (см. Рис. 3 и 5), срок строительства - 6 месяцев (с июля по декабрь 1987 года).

Поток III: длина 134 км, использованный сварочный материал - штучные электроды с целлюлозным покрытием (см. Рис. 4 и 6).

### **а) Сокращение сварочного персонала**

При выполнении работ по технологии сварки самозащитной порошковой проволокой (см. Рис. 5) были замерены временные интервалы, отражающие собственно сварку и зачистку швов (значения усреднены исходя из данных по 3 - 5 стыкам):

|                    |       |         |            |
|--------------------|-------|---------|------------|
| Проход №1 (1 пост) | E6010 | 2,7 мин | 3 сварщика |
|--------------------|-------|---------|------------|

|                     |        |         |                     |
|---------------------|--------|---------|---------------------|
| Проход №2 (2 поста) | NR-207 | 2,3 мин | 4 сварщика          |
| Проход №3 (2 поста) | NR-207 | 3,0 мин | 4 сварщика          |
| Проход №4 (3 поста) | NR-207 | 2,7 мин | 6 сварщиков         |
|                     |        |         | ВСЕГО: 17 сварщиков |

При таком расположении сварочных постов (см. Рис. 5) вся бригада выполняла сварку одного полного стыка каждые 3 минуты. Следовательно, при 10-часовом рабочем дне, с применением самозащитной порошковой проволоки ежедневно сваривалось 200 стыков.

При выполнении работ по технологии сварки стыка штучными электродами с целлюлозным покрытием на третьем потоке (см. Рис. 6) были зафиксированы следующие временные интервалы:

|                     |          |         |                     |
|---------------------|----------|---------|---------------------|
| Проход №1 (1 пост)  | E6010    | 3,5 мин | 3 сварщика          |
| Проход №2 (1 пост)  | E7010-A1 | 3,0 мин | 2 сварщика          |
| Проход №3 (1 пост)  | E7010-A1 | 4,0 мин | 2 сварщика          |
| Проход №4 (2 поста) | E7010-A1 | 7,0 мин | 4 сварщика          |
| Проход №5 (3 поста) | E7010-A1 | 5,3 мин | 6 сварщиков         |
|                     |          |         | ВСЕГО: 17 сварщиков |

На третьем и втором потоках количество сварщиков, привлекаемых к выполнению работ, было одинаковым. Но время, необходимое для выполнения 4 и 5 прохода на третьем потоке, почти в два раза превышает время, необходимое для сварки корневого слоя - прохода №1. Таким образом, темп сварки штучными электродами позволил делать лишь 100 полных стыков в течение 10-часового рабочего дня. (Более продолжительное время сварки корневого слоя на третьем потоке обусловлено недостаточно высокой квалификацией задействованных сварщиков и, обычно, не превышает 3 минут).

Вследствие такого дисбаланса между временем сварки корневого слоя (первого прохода) и временем сварки заполняющих слоев, характерными для технологии сварки стыка штучными покрытыми электродами, вторая группа сварщиков (выполняющих заполнение и облицовку) отставала от первой группы примерно на 1,5 км, как это показано на Рис. 6.

Рассмотрим вариант, при котором производительность сварки штучными электродами была бы равна производительности сварки самозащитной порошковой проволокой - 200 стыков в день. Обратим внимание на следующие соображения (см. Рис. 7):

а) Предположим что корневой шов (первый проход) выполняется за 2,7 минуты по обеим технологиям, отраженным на рисунках 3 и 4.

б) Проход №4

В действительности (см. Рис. 6) 4 сварщика выполняли его за 7 минут.

Чтобы выполнить четвертый проход за 2,7 минут потребуется:

$$\frac{7}{2,7} \times 4 = 10 \text{ сварщиков.}$$

в) Проход №5

В действительности (см. Рис. 6) 6 сварщиков выполняли его за 5,3 минуты.

Чтобы выполнить пятый проход за 2,7 минут потребуется:

$$\frac{5,3}{2,7} \times 6 = 12 \text{ сварщиков.}$$

Таким образом, если бы традиционная технология сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием была бы использована при строительстве второго потока трубопровода и требуемой производительностью работ был бы показатель 200 стыков в день, - потребовалось бы следующее количество сварщиков и сварочных постов (см. Рис. 7):

| <u>Проход №</u> | <u>Время сварки</u> | <u>Количество сварщиков</u> | <u>Количество постов</u> |
|-----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1               | 2,7 мин             | 3                           | 1                        |
| 2               | 3,0 мин             | 2                           | 1                        |
| 3               | 4,0 мин             | 2                           | 1                        |
| 4               | 2,7 мин             | 10                          | 5                        |
| 5               | 2,7 мин             | 12                          | 6                        |
|                 |                     | ВСЕГО: 29                   | 14                       |

Для выполнения всего объема работ на втором потоке трубопровода за 6 месяцев, что было сделано 17 сварщиками по технологии сварки самозащитной порошковой проволокой, технология сварки штучными электродами потребовала бы 29 сварщиков. Таким образом, применение порошковой проволоки повлекло экономию труда 12 сварщиков.

## **б) сокращение объема сварочного оборудования**

Сокращение необходимого числа единиц сварочных машин явилось прямым следствием уменьшения числа сварщиков, необходимых для выполнения работы. Поскольку каждому сварщику требуется свой независимый сварочный источник, процесс сварки самозащитной порошковой проволокой требует на 12 машин меньше.

Такое сокращение необходимого парка сварочной техники позволило не только сократить затраты на ее приобретение, но и сократить численность обслуживающего персонала, выполнявшего наладку и обслуживание сварочной аппаратуры. Кроме того, были сокращены затраты, связанные с транспортировкой оборудования вдоль трассы; уменьшение общего числа используемых сварочных агрегатов заметно упростило эту процедуру.

## **в) сокращение необходимого объема сварочных материалов**

Поскольку самозащитная порошковая проволока представляет из себя непрерывный проволочный электрод, его потери незначительны: из 7-килограммовой катушки приходится выбрасывать лишь участок длиной порядка 4 метров (отрезок, остающийся в кабеле горелки перед сменой катушки). При работе штучными электродами только порядка 70% каждого электрода оказываются израсходованными по назначению и 30% выбрасываются в виде огарков. Кроме того, вес обмазки штучных электродов вносит свой вклад в величину коэффициента наплавки, который для двух сравниваемых сварочных материалов имеет следующие величины:

82% для самозащитной порошковой проволоки, и  
50% для штучных покрытых электродов.

Таким образом, при использовании в качестве сварочного материала самозащитной порошковой проволоки происходит 32-процентное сокращение потребного объема материала.

Рассмотрим процесс сварки на втором потоке трубопровода:

- общее количество стыков, подлежащих сварке: 19358;  
- вес наплавленного металла на 1 стык: 1,78 кг;  
- общий вес наплавленного металла:  $19358 \times 1,78 \text{ кг} = 34457 \text{ кг}$ ;

- необходимый объем самозащитной порошковой проволоки:

$$\text{NR-207} = \frac{34457}{0,82} = 42021 \text{ кг};$$

- необходимый объем штучных покрытых электродов:

$$\text{E7010-A1} = \frac{34457}{0,50} = 68914 \text{ кг};$$

- прямая экономия материала:  $\text{Э}_{\text{пр}} = 68914 - 42021 = 26893 \text{ кг}$ .

К подсчитанной величине экономии необходимо прибавить вес металла, расходуемого при зачистке корневого слоя и выборке "карманов" (см. Рис. 4), так как это увеличивает требующий заполнения объем разделки. Измерения и подсчеты показали, что эта прибавка составляет порядка 10-15% от объема начальной разделки. Тогда:

- вес дополнительных электродов, равный дополнительной экономии:

$$\text{Э}_{\text{доп}} = \text{общий вес наплавленного металла} \times \frac{0,13}{0,50} = \frac{34457 \times 0,13}{0,50} = 8959 \text{ кг}.$$

Таким образом, общая экономия:  $\text{Э}_{\text{общая}} = \text{Э}_{\text{пр}} + \text{Э}_{\text{доп}} = 26893 + 8959 = 35852 \text{ кг}$ .

В результате такого подсчета можно заключить, что если бы штучные покрытые электроды использовались для строительства второго потока трубопровода, возникла бы необходимость в закупке дополнительных 35852 килограммов электродов.

## **г) сокращение количества абразивных дисков**



Как было отмечено ранее, при сварке самозащитной порошковой проволокой выполнялась незначительная зачистка корневого слоя (см. Рис. 3) за исключением некоторых случаев более тщательной зачистки рестартов. В связи с этим количество абразивных дисков, необходимых для выполнения работы, было заметно понижено по сравнению с технологией сварки стыков штучными покрытыми электродами.

При выполнении работ на потоках II и III потребление абразивных дисков происходило в следующих объемах:

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| сварка штучными электродами  | 1 диск на 2 стыка,   |
| сварка порошковой проволокой | 1 диск на 10 стыков. |

Если бы все 19358 стыков на втором потоке были заварены штучными покрытыми электродами, количество требуемых для этого дисков составило бы:

$$N_{шт} = \frac{19358}{2} = 9679 \text{ дисков.}$$

Однако, при использовании технологии сварки стыка с применением порошковой проволоки для выполнения горячего и всех последующих слоев (Рис. 3) потребление дисков было в объеме:

$$N_{пп} = \frac{19358}{10} = 1936 \text{ дисков.}$$

Таким образом, экономия составила:

$$N_{шт} - N_{пп} = 9679 - 1936 = 7743 \text{ диска.}$$

Необходимо отметить, что сокращение расходуемого количества дисков не сопровождалось экономией времени и сил вспомогательных рабочих, выполнявших зачистку. Вне зависимости от времени зачистки они, так же как и в случае сварки штучными электродами, постоянно сопровождали сварщиков и единственным отличием в их работе было меньшее время зачистки и меньшая усталость.

#### **д) сокращение ремонтных работ**

При выполнении настоящих расчетов должны быть учтены дефектные швы, так как их ремонт влияет на общую стоимость выполняемых работ. К сожалению, у автора нет достаточных данных для четкого и сравнения ремонтных работ, выполненных при сварке штучными электродами и самозащитной порошковой проволокой. Однако, имеются данные по 3987 стыкам, заваренным в августе 1987 года самозащитной порошковой проволокой. Процент ремонта составил следующую величину:

$$\%PEM = (\text{Отремонтированная длина} / \text{Общая длина, прошедшая контроль}) \times 100;$$

$$\%PEM = \frac{12,84 \text{ м}}{1572 \text{ м}} \times 100 = 0,82\%.$$

Столь низкий процент ремонтных работ указывает на высокое качество сварки самозащитной порошковой проволокой. Инспекционный комитет заказчика - компании Газ дэль Эстадо - решил, что будет достаточным подвергать рентгенографическому исследованию 10% сваренных за день стыков.

Опыт показывает, что 50% обнаруженных и отремонтированных дефектов связаны с корневым слоем, выполненным штучными электродами с целлюлозным покрытием класса E6010 (см. Рис. 3).

Для сравнения можно отметить, что, по опыту строительства предыдущих объектов по технологии сварки штучными покрытыми электродами, процент требующих ремонта стыков обычно находился в пределах 3 - 5%. Следовательно, все сказанное выше указывает на правильность предположения о понижении затрат на ремонт, которое обеспечивается применением технологии сварки самозащитной порошковой проволокой.

#### **Дополнительные соображения**

Замена традиционного метода сварки штучными электродами полуавтоматической сваркой самозащитной порошковой проволокой не привнесла каких-либо дополнительных трудностей, связанных с защитой сварщиков от ультрафиолетового излучения или теплового воздействия. Не потребовалось, так же, и специальной адаптации оборудования сборки стыков под сварку или дополнительных затрат на обслуживание сварочных горелок. Техническое обслуживание оборудования выполнялось тем же составом работников, что и при использовании метода сварки штучными электродами.

### **III.3. Общий объем затрат и экономии средств**

В Таблице 4 представлены затраты по различным статьям, связанные с применением методов сварки штучными электродами и самозащитной порошковой проволокой и наглядно представлено их отличие друг от друга. Данные таблицы получены при исследовании процесса работы на втором потоке трубопровода, т.е. относятся лишь к одному его участку длиной 631 км. Величины затрат в таблице приведены в Долларах США.

| Статья расхода         | Затраты на единицу  | Объем затрат при использовании сварки |   |
|------------------------|---|---------------------------------------|---|
|                        |   | штучными электродами                  | порошковой проволокой                         |
| Сварочный персонал     | 26 сварщиков × 6 месяцев × \$2,600. в месяц<br>26 помощников × 6 месяцев × \$300. в месяц<br>14 сварщиков × 6 месяцев × \$2,600. в месяц<br>14 помощников × 6 месяцев × \$300. в месяц              | \$405,600.<br>\$46,800.               | \$218,400.<br>\$25,200.                       |
| Сварочное оборудование | Агрегаты SAE-400, 29 шт × \$6,330.<br>Агрегаты SAM-400, 17 шт × \$8,039.<br>Механизмы подачи LN-23P, 17 шт × \$823.<br>Сварочные горелки, 17 шт × \$184.<br>Контактные наконечники, 560 шт × \$0.50 | \$183,570.                            | \$136,663.<br>\$13,991.<br>\$3,128.<br>\$280. |
| Сварочные материалы    | Штучные электроды с целлюлозным покрытием класса E7010-A1, диаметр 5,0 мм, 68914 + 8959 = 77973 кг × \$2.50/кг.<br>Порошковая проволока Innershield NR-207, диаметр 2,0 мм, 42021 кг × \$3.64/кг    | \$194,932.                            | \$152,956.                                    |
| Абразивные диски       | 9679 дисков диаметром 7" × \$2.50 за штуку<br>1936 дисков диаметром 7" × \$2.50 за штуку  | \$24,197.                             | \$4,840.                                      |
| Зачистные машины       | 12 угловых зачистных машин по диск 7" по \$530. каждая  | \$6,360.                              |   |
| ОБЩИЕ ЗАТРАТЫ:         |   | \$861,459.                            | \$555,458.                                    |
| ЭКОНОМИЯ:              |   | \$306,001.                            |   |

**Таблица 4.** Сравнительный анализ затрат применения сварки штучными электродами и самозащитной порошковой проволокой при строительстве второго потока газопровода Loma de la Lata.

Реальный объем экономии средств при выполнении работ на втором потоке составил 306 тысяч долларов США. Общий объем полученной экономии в целом по трубопроводу был несколько выше, поскольку участок длиной 114 км на первом потоке так же был построен с применением технологии сварки самозащитной порошковой проволокой.

## **ВЫВОДЫ**

1. Процесс сварки самозащитной порошковой проволокой может вестись при сильном порывистом ветре, когда невозможно применение штучных покрытых электродов.
2. Высокая плотность тока и проплавление, характерные для процесса сварки порошковой проволокой, обеспечивают надежное удаление всех сварочных дефектов, оставшихся в предыдущих слоях, и, следовательно, высокое качество сварного соединения, подтверждаемое рентгенографическими методами контроля.
3. Металл, наплавляемый самозащитной порошковой проволокой содержит в десять раз меньший объем диффузионного водорода по сравнению с тем же показателем сварки штучными электродами с

целлюлозным покрытием. В этом плане порошковая проволока сравнима со штучными электродами с основным покрытием класса E7018.

4. Бригада из 17 сварщиков за десятичасовой рабочий день способна сварить 200 стыков с использованием технологии сварки самозащитной порошковой проволокой; и лишь 100 стыков могут быть выполнены теми же силами при использовании сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием.
5. Для выполнения строительства участка трубопровода той же длины (631 км) за то же время (6 месяцев), как это было сделано 17-ю сварщиками, работавшими по технологии сварки порошковой проволокой, по технологии сварки штучными электродами потребовалось увеличение бригады до 29 человек.
6. На участке трубопровода, для строительства которого была использована технология сварки самозащитной порошковой проволокой и задействовано меньшее число сварщиков, произошло соответствующее сокращение парка сварочного оборудования и понижение связанных с этим расходов на его обслуживание и транспортировку, особенно на труднодоступных участках.
7. Сварка самозащитной порошковой проволокой требует значительно меньшего объема сварочных материалов и меньшее количество абразивных дисков чем традиционная сварка штучными электродами с целлюлозным покрытием.
8. При строительстве аналогичных трубопроводов с применением сварки штучными электродами процент требующих ремонта стыков колебался в пределах 3-5% от общего числа сваренных, в то время как при использовании технологии сварки самозащитной порошковой проволокой был отмечен уровень ремонта менее 1%.
9. Уровень экономии, достигнутый при переходе на технологию сварки порошковой проволокой, превысил 300 тысяч долларов США.
10. Несмотря на время, необходимо затраченное на внедрение новой технологии в сложившийся производственный процесс, была достигнута требуемая производительность работ. Сварка самозащитной порошковой проволокой зарекомендовала себя как процесс, имеющий ряд неоспоримых преимуществ перед традиционным методом сварки штучными электродами, особенно при сварке заполняющих проходов. На сегодняшний день сварка порошковой проволокой становится доминирующей технологией при строительстве трубопроводов большого диаметра.



Международная штаб-квартира  
22801, St. Clair Avenue  
Cleveland, Ohio 44117-1199, USA  
тел.: (216)481-8100  
факс: (216)486-1363

Московский офис  
117970, Москва  
ул. Житная, 14  
тел.: (095)238-6645  
факс: (095)238-6623