

обстоятельством, что исследователи, занимающиеся сваркой, вели сварку без учета структуры материала.

Для того, чтобы подойти рационально к сварке чугуна, нужно варить не случайные чугуны, а следует взять чугуны, которые имели бы постоянный состав по марганцу и углероду и переменный состав по кремнию.

Рациональнее всего взять синтетические чугуны, что и было сделано автором.

Чугун, как материал для сварки

Общее понятие—„серый чугун“—объединяет целый ряд сплавов. У сплавов, носящих название серых чугунов, имеются общие признаки по составу и структуре, именно—наличие в разных сочетаниях железа, углерода и кремния. По структуре общим признаком является наличие включений графита. Чугуны, содержащие в микроструктуре одновременно связанный углерод в виде цементита и свободный в виде графита, называют половинчатыми или переходными.

Название белого чугуна сохраняется за чугунами, имеющими в структуре весь углерод только в связанном виде, в виде карбида железа.

Чугуны, имеющие свободный углерод в виде графита в той или иной форме выделения и не имеющие в структуре свободного цементита, носят название серых чугунов.

Микроисследование серых чугунов указывает на наличие в них четырех главных структурных составляющих: графита, перлита, феррита и стэдита (двойная или тройная фосфидная эвтектика). Кроме указанных структурных составляющих, отливки из серого чугуна содержат небольшое количество включений сернистого марганца.

Основная металлическая масса отливки серого чугуна состоит из следующих структурных составляющих в разных сочетаниях: феррит, перлит и стэдит плюс некоторые неметаллические включения в небольшом количестве.

Феррит в свободном виде встречается в чугунах с низким содержанием связанного углерода. В случае крупнозернистой структуры чугуна феррит можно наблюдать в виде оторочки вокруг крупных пластинок графита. При мелкозернистой структуре чугуна мелкие графитовые включения расположены в феррите (в таких случаях мы имеем так называемую графитовую эвтектику).

Серые чугуны с большим количеством феррита относительно мягки и легко поддаются механической обработке. Ферритовые серые чугуны за счет пластичности феррита обладают большей вязкостью, нежели чугуны с неферритовой структурой основной металлической массы.

Карбид железа Fe_3C в свободном виде не встречается в серых чугунах, входя только в состав перлита.

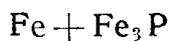
Цементит—метастабильная фаза при определенных температурных условиях разлагается на феррит и графит.

При некоторых условиях охлаждения отливки серого чугуна по структуре могут состоять исключительно из феррита и графита.

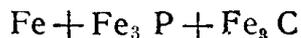
Перлит в чугунах, подобно перлиту в сталях, имеет вид пластинчатого эвтектоида, причем механические свойства перлита в значительной степени зависят от величины пластинок феррита и цементита в нем.

Так, например, мелкопластинчатый перлит отличается большей прочностью по сравнению с крупнопластинчатым. Образование перлита из аустенита эвтектоидного состава в промышленных чугунах происходит при температуре $719—732^\circ$ с положительным тепловым эффектом и изменением магнитных свойств.

Стэдит. Весь фосфор в чугуне находится в форме стэдита. Стэдит двойная или тройная эвтектика состава:



или



Температура плавления стэдита около 982° .

Графит. В результате исследований рядом авторов [1; 2] установлено, что механические свойства серых литейных чугунов в основном обусловлены количеством, величиной, формой и характером распределения включений графита.

По типу графитовые выделения разделяются так: а) пластинчатые, равномерно распределенные; б) розеточные, кустообразные; в) первичный графит (сверхкрупный); г) дендритообразный; д) дендритообразный с предпочтительной ориентацией.

Графитовые выделения классифицируются также по размерам: а) крупный; б) средний; в) мелкий; г) очень мелкий; д) точечный [3].

При недостатке кремния после охлаждения и кристаллизации чугуна углерод сохраняется в связанном виде в форме цементита.

Присутствие достаточного количества кремния может обеспечить разложение карбида железа на феррит и углерод в форме графита.

Цементит является метастабильной фазой; феррит и графит устойчивы в пределах от комнатной температуры до температуры эвтектоидного превращения. Есть указания на полную графитизацию малоуглеродистой стали с содержанием 0,15% углерода. Эта сталь была взята от трубы перегонного куба крекингзавода и нагревалась до температуры несколько ниже эвтектоидной в течение трех лет.

Основные способы сварки чугуна

Сварка чугуна делится на холодную и горячую. Горячей сваркой принято называть сварку с подогревом свариваемой детали в интервале $500\text{--}900^\circ$. Холодная сварка проводится совершенно без подогрева свариваемой детали; затем возможен третий вариант—полугорячая сварка с подогревом $500\text{--}700^\circ$ и так называемая „сварка с подогревом“, когда деталь слегка подогревается в пределах 200° . Как в холодной, так и в горячей сварке возможно, в свою очередь, несколько вариантов в зависимости от материала электрода. В применении к сварке чугуна эти варианты могут быть следующими:

1. Материал электрода одинаков по составу со свариваемым чугуном.

2. Материал электрода чугун, но имеет иной химический состав, нежели материал свариваемой детали.

Материал электрода обычно более богат графитообразующим элементом—кремнием и беден элементом, препятствующим графитизации,—марганцем.

3. Чугун можно сваривать стальным электродом.

4. Сварка медным, нейзильберовым электродами или электродами из мовель-металла.

Горячая сварка чугунами электродами—процесс, усложненный необходимостью осуществления равномерного подогрева громоздких деталей до сравнительно высоких температур, порядка $500\text{--}900^\circ$. Процесс чрезвычайно неприятный и дорогой.

Технологический процесс холодной сварки значительно проще и дешевле, но при холодной сварке скорость остывания шва много больше, нежели скорость остывания детали в процессе ее изготовления отливкой

и, как следствие, можно получить чрезвычайно неприятные структурные изменения в шве—отбеленный шов; последние придают шву значительно пониженные механические свойства (хрупкость). Наличие цементита в шве серого чугуна—явление совершенно недопустимое, так как при ударной нагрузке трещины пойдут прежде всего по включениям цементита, а уже потом по включениям феррита.

В случае малых габаритов детали возможно исправление структуры отбеленного шва последующей термической обработкой шва; последнее обстоятельство также говорит за преимущество холодной сварки перед горячей и полугорячей. Применение различных методов сварки чугуна в последние годы имело целью, главным образом, заварку дефектов чугунного литья и ремонтные работы по чугунным изделиям.

Графитизация сварного шва

Графитизация чугунного шва зависит от совокупности следующих обстоятельств: его состава, условий плавления, условий заливки и скорости охлаждения. В первом приближении возможно провести аналогию между охлаждением шва и отливкой в металлическую постоянную форму (кокиль). Конечно, имеется некоторая разница, именно: между стенкой изложницы и поверхностью отливки существует тесное соприкосновение лишь в первый момент, пока залитый металл еще не затвердевает. Как только образуется корка, так тотчас между поверхностью отливки и стенками кокиля вследствие усадки образуется тонкая, воздушная прослойка и переход тепла в кокиль сильно замедлится. При затвердевании шва до самого последнего момента между швом и материалом детали остается весьма тесное соприкосновение, и передача тепла идет быстрее, нежели при отливке в формы. Но в качестве первого приближения можно воспользоваться опытными данными кокильной отливки для суждения о том, какой состав должен иметь шов, чтобы в процессе остывания он не отбелился вследствие быстрого отвода тепла в холодную свариваемую деталь.

Н. П. Дубинин [4] для определения влияния химического состава чугуна, залитого в чугунные формы, на структуру отливки заливал угольные образцы толщиной от 5 до 40 мм, шириной 70 мм и длиной 210 мм в чугунные, подогретые до 170—200° формы с толщиной стенок 25 мм. Оказалось, что ферритная структура отливки (толщина которой 10 мм) получается при содержании кремния 4,5% и углерода 2,5%. По мере увеличения содержания углерода снижается необходимое содержание кремния; так, при 4,6% углерода кремния необходимо лишь 2,5%. Перлитный чугун можно получить соответственно при 4% кремния и 2,5% углерода и 2% кремния и 4,6% углерода.

Конечно, эти опыты только примерно дают представление о необходимом химическом составе шва с той или иной структурой.

Как уже в свое время было сказано, скорость охлаждения шва значительно больше, нежели скорость охлаждения кокильной отливки.

Н. П. Дубинин [4] дает для отливки толщиной в 5 мм формулу для скорости охлаждения в интервале 1150—100° (по истечении t сек.)

$$v = 2,348 t^{-0,00255 t}$$

t — время охлаждения в секундах.

Наши наблюдения над скоростью охлаждения швов толщиной в 3—5 мм, наплавленных на холодные чугунные плитки толщиной 25 мм, показали, что скорость охлаждения швов по крайней мере в 2—3 раза больше вычисленной по этой формуле. Скорость остывания определялась на поверх-

ности в интервале температур 1000—700° путем наблюдения изменения температуры оптическим пирометром.

Поэтому и содержание кремния в наших электродах (при среднем содержании углерода в 3%), дающих ферритные швы при наплавке на ферритные пластинки, получилось около 5%, а при наплавке на перлитные чугуны—около 6%.

В последнем случае перлитный чугун детали, смешиваясь с ферритным электродом (при условии, если кремния в смеси будет меньше 5%), может дать, хотя и очень небольшие, но все-таки крайне нежелательные включения ледебуритного цементита. Этим объясняется, почему так трудно сваривать стальным электродом, который в процессе переплавки легируется за счет обмазки кремнием и углеродом. Науглероживание такого электрода с трудом можно довести до 2,5% С, а легирование кремнием—до 3%, что при быстром остывании дает перлитно-графитную структуру, в которой при малейшем ускорении охлаждения или изменении состава в сторону снижения содержания кремния и углерода появляется цементит.

Выводы

1. Металл шва имеет более высокую температуру начала затвердевания по сравнению с чугуном обычной отливки.

2. Вследствие более высокой температуры нагрева имеется менее оснований ожидать большого числа центров кристаллизации в виде зародышей графита.

3. Поэтому можно полагать, что графитизация идет за счет распада твердой фазы.

4. Науглероживание стального электрода до чугуна идет, вероятно, за счет действия газовой фазы, а не твердого графита, что и исключает наличие готовых центров кристаллизации.

Материалы и методика работы

Синтетические и серые литейные чугуны

Вопрос холодной электродуговой сварки чугуна ввиду специфических свойств последнего принадлежит к числу наиболее сложных проблем сварочной техники. Отбеливание в процессе охлаждения шва, низкая прочность и вязкость создают предпосылки для образования трещин в швах и зон повышенной твердости.

Нами были поставлены следующие вопросы, которые подвергались изучению:

1. Возможность применения стальных электродов с легирующей обмазкой для холодной сварки чугуна.

2. Возможность применения обмазанных чугунных электродов с различным содержанием главного легирующего элемента (кремния) для холодной сварки чугуна.

Экспериментальная часть работы была начата с изготовления образцов чугуна для последующих опытных наплавов. Были отлиты пластинки из синтетического чугуна размерами 15×70×200 мм.

Для изготовления синтетического чугуна сталь марки У9А плавилась в графитовом тигле емкостью в 5 кг.

При температуре 1500° расплав науглероживался при перемешивании его электродным углем. Сначала растворение угольного стержня в расплаве шло очень быстро, но затем процесс науглероживания замедлялся, так что перемешивание приходилось вести в течение 1—2 час.

Кроме указанного способа изготовления синтетического чугуна, последний приготавливался также из хорошего уральского кровельного железа. Обрезки железа предварительно цементировались до содержания углерода в 1,5%. Цементация осуществлялась в карбуризаторе обычного состава из древесного угля и поташа. Цементованные таким образом обрезки железа затем плавилась и науглероживались в графитовом тигле так же, как и в предыдущем способе изготовления синтетического чугуна из стали У9А. Как показал анализ, и в том и в другом случае получался белый чугун почти одинакового состава. Несколько плавок, изготовленных описанными выше способами, в свою очередь переплавлялись в большом тигле емкостью 35 кг.

Полученный таким образом синтетический чугун имел следующий химический состав (в процентах).

Собщ. %	Si%	Mn%	S%	P%
3,70	0,52	0,40	0,02	0,04

Отлитый в мелкие чушки чугун являлся исходным материалом для приготовления электродов и пластинок для экспериментальной сварки. Кроме того, мы изготовили электроды и пластинки для сварки из серого литейного (коксового) чугуна марки 0 и 1.

Взяв за основу синтетические чугуны, мы приготовили путем переплавления в малом тигле (емкостью 5 кг) пластинки для сварки следующих размеров: толщина 15—20 мм, ширина и длина—70×200 мм. Такая толщина пластинок была выбрана из тех соображений, что в практике встречаются детали именно такой толщины (обычное машинное литье). Пластинки отливались в вертикальном положении в сырые земляные формы. Для легирования полученных таким образом пластин и электродов применялся ферросилиций.

Химический анализ плавок, отлитых для экспериментальной сварки, дал результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

№ п. п.	Собщ. %	Si%	Mn%	S%	P%
1	2,80	2,12	0,40	—	—
2	2,53	4,23	0,36	0,016	0,006
3	—	0,88	0,07	—	—
4	2,68	1,33	0,31	—	—
5	3,35	0,93	0,08	0,030	0,013
6	2,48	1,76	0,32	—	—
7	2,53	3,00	0,27	—	—
8	2,48	4,53	0,32	—	—
9	3,16	1,82	0,07	—	—
10	2,62	2,89	0,39	—	—

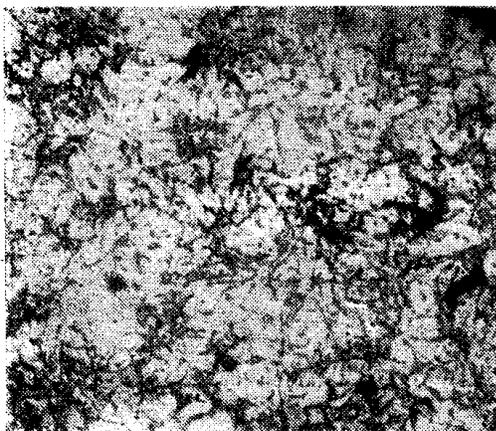
Электроды изготовлялись из того же синтетического и коксового серого чугуна марки 0. В качестве легирующих элементов применялся ферросилиций. Электродные стержни отливались в сухую глиняную форму. Размеры стержней $d=5$ мм и длина 250 мм. Вполне возможно, как показали опыты, отливать электроды в металлические формы. Анализ электродного материала и описание структур даны в табл. 2.

Таблица 2

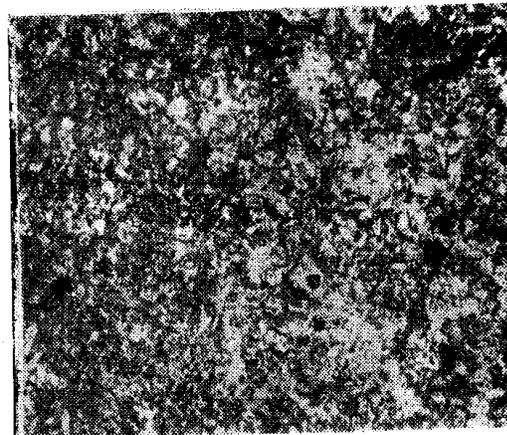
Микроструктура	№ плавков	Si%	Al%	Ni%
Феррит, немного перлита	1	4,9	1,0	—
Феррит	2	8,7	1,5	—
Феррит	3	8,0	—	—
Феррит + перлит	4	4,8	—	—
Перлит, немного цементита	5	4,6	—	1,8
Перлит, немного феррита	6	6,2	—	1,3
Феррит	7	6,7	—	—

Для улучшения условий графитизации (получение мелкого завихренного графита) в электродные плавки вводился не только кремний, но иногда алюминий и никель.

Структуры некоторых электродов приведены на фиг. 1, 2.



Фиг. 1



Фиг. 2

Микроструктура материала электрода, изображенного на фиг. 1, представляет собой ферритную основную металлическую массу с включениями крупнопластинчатого графита.

Микроструктура материала электрода, представленного фиг. 2,—феррит с включениями небольшого количества перлита и графит.

Всего было отлито восемь плавков электродов. Химический состав и микроструктура электродов различных плавков приведены в табл. 2.

Благодаря применению сухой формы для отливки электродов их структуры очень мало меняются по сечению, характер выделения графита и основной металлической массы также весьма мало разнятся по сечению. Структура с краю и в середине образца была почти одинакова. Электроды, отлитые в металлические формы, имели по сечению резко переменную структуру. Электроды с малым содержанием кремния при этом слегка отбеливались, но последнее обстоятельство никакого влияния на процесс сварки не оказывало. Имеющийся выбор пластинок различного химического состава и электродов нескольких вариаций по составу и микроструктуре для экспериментальной сварки позволил выяснить возможность и результаты сварки различными сочетаниями комбинаций электродов и основного материала.

Теоретические предпосылки для выбора структуры электрода

Качество шва, результаты сварки и прежде всего провар зависят от характера плавления электрода с одной стороны и от вида дуги—с другой.

Быстросплавляющийся электрод, стекающий крупными каплями, как известно, не дает хорошего провара. Недостаточный провар дает также длинная дуга и дуга малой мощности.

При полюсности дуги, не соответствующей характеру ионизации дугового пространства (например, в случае постоянного тока), также возможен непровар.

Учитывая влияние характера плавления электрода на провар, очень важно предварительно выяснить, как должен плавиться чугунный электрод различной структуры.

Теория плавления серого чугуна дана Н. В. Гутовским [5]. Вкратце она сводится к следующему: „В плавлении серого чугуна следует различать три периода:

1. Цементация твердого металла.
2. Образование жидкой фазы путем цементации.
3. Собственно плавление“.

Процесс цементации аустенита графитом в первом периоде обуславливает как раз температуру плавления чугуна, являющуюся переменной для одного и того же чугуна в зависимости от скорости нагревания. Температура конца плавления, очевидно, зависит от хода второго и третьего периодов и поэтому тоже не является постоянной, а зависит от скорости нагревания и характера структуры.



Фиг. 3

Чем более мелкозернистый графит, чем он равномернее расположен в основной металлической массе, тем быстрее пройдет, при всех прочих обстоятельствах, цементация, тем ниже будет температура плавления.

Очевидно, при бесконечно быстром нагреве температура плавления перлитного чугуна будет соответствовать температуре плавления именно перлитной стали, а ферритного чугуна—чистого железа. Ферритный чугун при очень быстром нагревании расплавится при 1530°.

Кроме того, возможно всплывание графита в расплавленном чугуне. Это замедлит цементацию и повысит температуру плавления. Опять-таки, чем завихреннее и разветвленнее графит (графитовая эвтектика, фиг. 3), тем труднее ему всплывать, тем больший промежуток времени он будет соприкасаться с нерасплавившимися частями структуры, тем энергичнее будет цементация. По выражению Н. В. Гутовского [5]: „Температуры начала и конца плавления серого чугуна являются зависимыми от количества связанного углерода в чугуне, от скорости нагрева и от неподдающегося учету влияния—образования спели“.

Становясь на точку зрения Н. В. Гутовского, необходимо признать, что всего быстрее будут плавиться перлитные электроды и медленнее всего—чисто ферритные. Это подтверждается непосредственным опытом. Мы пробовали варить чугунными электродами различного состава без обмазки. Для возможности горения дуги на переменном токе электроды и место сварки покрывались тонким слоем поташа. Опыт показал, что ферритный электрод плавится примерно процентов на 20 медленнее, чем перлитный, дает капли меньшего размера и более хороший провар.

Из этих соображений можно рекомендовать электроды, имеющие микроструктуру феррит+графит.

Электродные покрытия

Проверка на практике обмазок электродов, рекомендуемых в литературе

Нами было испробовано несколько вариантов обмазок электродов, рекомендуемых в литературе для сварки чугуна, и обмазок, варианты состава которых предложены нами (табл. 3).

В процессе сварки электродами с данными обмазками мы обращали внимание, с одной стороны, на поведение обмазки при плавлении электрода, а с другой—на результаты наплавки. Нас особо интересовала микроструктура наплавленного металла. Рецепты обмазок, микроструктура применяемых электродов и результаты наплавки сведены нами в одну табл. 3.

Таблица 3

Составы обмазок	Колич. сост. частей весовых	Микроструктура электрода	Результаты наплавки
1. Уголь древесный Графит Ферросилиций Алюминий Мел Полевой шпат Растворимое стекло натриевое с добавкой 10% калиевого.	8 10 15 1 9 15	Обмазка употреблялась с электродами 1,4 и 5-й плавки 1. Феррит, немного перлита 4. Феррит+перлит 5. Перлит, немного ледебурита	Обмазка тугоплавкая, но работать вполне возможно
2. Древесный уголь Бура Мел Ферросилиций	25 8 12 20	Обмазка употреблялась с электродом 4-й плавки 4. Феррит+перлит	Обмазка тугоплавкая Варить нельзя Наплавленный металл по структуре представляет собой серый чугун
3. Древесный уголь Ферросилиций Окалина Алюминий Мел	20 15 6 2 12	Обмазка употреблялась с электродом 4-й плавки 4. Феррит+перлит	Обмазка плохо плавится Варить почти нельзя Наплавленный металл по структуре представляет собой серый чугун
4. Графит Карборунд Барий углекислый Мел	40 60 5 5	Обмазка для стальных электродов Структура—феррит, немного перлита	Структура наплавки содержит 1,7% С, имеются следы графита и ледебурита, наплавка по структуре неудовлетворительная
5. Первый слой обмазки Уголь древесный Ферросилиций Поверх первого слоя толщиной до 1,0 мм обмотка из железной проволоки (0,6) с промежутками, равными диаметру.	50 50	Результат сварки стальными электродами, обмотанными проволокой, с применением указанной трехслойной обмазки	

Составы обмазок	Колич. сост. частей ве-совых	Микроструктура электрода	Результаты наплавки
<p>6. Второй слой обмазки</p> <p>Уголь древесный Ферросилиций Мел Растворимое стекло.</p> <p>Третий слой обмазки</p> <p>Чистый графит на растворимом стекле</p>	<p>5 5 5</p>		<p>Наплавка представляет собой сталь с содержанием углерода 1,7%, иногда белосерый чугун с 2,2% С. Микроструктура стального электрода: феррит + незначительное количество перлита. Дуга держалась хорошо</p>
<p>7. Обмазка для электродов, обмоточных проволок</p> <p>Первый слой обмазки</p> <p>Уголь древесный Ферросилиций Мел Алюминий</p> <p>Второй слой обмазки</p> <p>Уголь древесный Ферросилиций Алюминий Окалина</p> <p>Третий слой</p> <p>Чистый графит на растворимом стекле</p>	<p>5 5 3 4</p> <p>5 5 1 4</p>	<p>Электроды стальные, обмотанные проволокой</p>	<p>Белосерый чугун с 2,0—2,2% углерода. После отжига — серый перлит-ферритный чугун</p>
<p>8. Обмазка для электродов, обмоточных проволок.</p> <p>Первый слой обмазки</p> <p>Уголь древесный Ферросилиций Мел Алюминий Окалина</p> <p>Второй слой обмазки</p> <p>Уголь древесный Ферросилиций Алюминий Окалина</p> <p>Третий слой</p> <p>Чистый графит на растворимом стекле.</p>	<p>5 5 3 1 4</p> <p>5 5 1 4</p>	<p>Электроды стальные</p>	<p>Обмазка тугоплавкая</p> <p>Один из наваренных швов дал непровар. Другой шов дал вполне удовлетворительный провар.</p> <p>В некоторых случаях сварки данными электродами получился белосерый чугун</p>

Выводы по § 1

1. В обмазку 1 мы ввели алюминий, как сильный раскислитель и графитизатор, и частично калиевое стекло для осуществления хорошей ионизации.

Полевой шпат был введен для увеличения количества шлака (защита шва от охлаждения). В дальнейших обмазках полевой шпат выброшен, как напрасно уменьшающий концентрацию наиболее важных составных частей обмазки—кремния и углерода.

2. Обмазка с бурой подкупает легкой регулируемостью температуры плавления и возможностью, если надо, снижения ее до 600—700°.

Бура плохо проводит ток, ионизация дуги плохая. Варить с помощью обычного трансформатора нельзя.

3. Обмазки, составленные по типу обмазок Ярхо (6; 7), эффекта не дали.

4. Обмазки с карборундом не дали хороших результатов.

5. В двухслойных обмазках реакции идут в первом слое, второй слой защищает эти реакции от влияния атмосферного кислорода и азота.

Калийное стекло прибавлено в первый слой, где нужна хорошая ионизация. Толщина обмазок первого и второго слоя одинакова. Применять полевой шпат в обмазках не следует.

6. Трехслойная обмазка.

Чтобы улучшить легирование стали, мы попытались применить трехслойную обмазку, с внутренней обмоткой из стальной 0,5% С проволоки.

Первый слой дает легирование и ионизацию (для ионизации древесный уголь выварен в растворе поташа).

Второй слой—защита и легирование, третий—только защита, как в двухслойной обмазке.

Окончательно мы приняли обмазки для чугунных электродов на основании опытов по выяснению перехода углерода и кремния из обмазки в шов (материал электрода).

Практика смешения составных частей электродных покрытий

Качество электродного покрытия в большой степени зависит от качества изготовления сухой смеси. Все составные части, входящие в состав сухой смеси, раздроблялись и просеивались на соответствующих ситах. Для ферросплавов (ферросилиция) мела и органических веществ рекомендуется сито с 1200 отверстий на квадратный сантиметр.

После размола составные части перемешивают и затем вливают разведенное в воде жидкое стекло и вся масса еще раз размешивается и растирается в большой фарфоровой ступке.

Обмазка наносилась в два слоя путем окунания. После первого слоя обмазанный электрод сушился на воздухе до затвердевания обмазки, затем наносился второй слой и подвергался воздушной сушке в течение 20 часов в лаборатории при +20°C, после чего электроды прокаливались при температуре 100—120°C в течение 1 часа.

Классификация обмазок и требования, предъявляемые к ним

Основным назначением всех обмазок является повышение качества наплавленного металла. Обмазки делятся на тонкие или ионизирующие и толстые или качественные.

Толстые или качественные обмазки изменяют химический состав, структуру и механические свойства наплавленного металла, причем действие их в полной мере проявляется при некоторой определенной толщине слоя, отчего они и носят название толстых обмазок.

Качественные обмазки должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Давать шлак, защищающий расплавленный металл от воздействия атмосферного воздуха и замедляющий его остывание. Этому требованию практически удовлетворяют все качественные обмазки.

2. Давать при плавлении слой газа, необходимый для того, чтобы, с одной стороны, предохранять расплавленный металл от воздействия атмосферного воздуха, а с другой стороны,—увеличивать стабильность дуги; это требование не обеспечивается обмазками, в которых отсутствуют газообразующие компоненты.

3. Температура плавления обмазки должна лежать в пределах, близких к температуре плавления электрода, иначе, при легкоплавкой обмазке возможно оголение конца электрода и неравномерное распределение шлака на отдельных участках шва, а при слишком тугоплавкой обмазке металл электрода выплавляется, и выступающая часть обмазки образует слишком глубокую чашечку. Это ведет к удлинению дуги и в конечном счете к частым обрывам ее.

4. Обмазка должна обеспечить устойчивое горение дуги при сварке на переменном токе.

5. Обмазка должна плотно прилегать к электроду, покрывая его равномерным слоем, и не трескаться.

Шлак, полученный в результате плавления обмазки, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Растекаясь по наплавленному металлу, покрывать его равномерным слоем; следовательно, шлак не должен быть слишком вязким. Этому требованию практически удовлетворяют все качественные обмазки.

2. Шлак должен покрывать наплавленный металл и этим замедлять скорость его остывания для того, чтобы растворенные в металле газы и неметаллические включения более полно удалялись из него.

3. Шлак должен восстанавливать или поглощать окислы металла, т. е. реагировать с наплавленным металлом, раскисляя его и тем самым улучшая его механические свойства.

4. Застывший шлак должен легко поддаваться удалению с наплавленного металла.

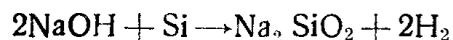
Обмазки, рекомендуемые автором

В качестве связующей составной части для смеси электродного покрытия мы применяем жидкое стекло.

По временным техническим условиям, растворимое стекло, употребляющееся в качестве связующей составной части для электродных покрытий, должно иметь модуль 2,8 (9), а еще лучше, если модуль равен 3,0.

Анализ стекла производился по способу, описанному П. К. Григорьевым.

В качестве легирующей составной части в наши обмазки вводился ферросилиций (80% Si). Как известно, ферросилиций реагирует с избыточным, не связанным с Na_2O , SiO_2 . Реакция сопровождается выделением водорода (в присутствии воды)



Данная реакция идет медленно, несколько ускоряясь с повышением температуры; последнее особенно досадно, так как водород, выделяясь при сушке загустевшей обмазки, делает ее пористой. При сушке обмазка увеличивается в объеме на 50—100%. Пузырьки газа при плавлении обмазки увеличиваются в несколько раз, жидкий шлак имеет характер пены и легирование расплавленного металла идет очень слабо. Пористая

Обмазка имеет малую теплопроводность, не успевает нагреваться за счет тепла дуги насквозь, и поэтому часть ее остается нерасплавленной и не участвует в реакциях сварочного фокуса.

Путем пассивирования ферросилиция мы пытались затруднить взаимодействие ферросилиция с жидким стеклом, но эта мера, снизив пористость обмазки, не уничтожила полностью выделения водорода. Пассивирование заключалось в нагревании при доступе воздуха до различных температур готового, мелкого порошка ферросилиция. Как известно, на поверхности отдельных кристалликов ферросплава уже при комнатной температуре образуется весьма быстро (в течение сотых долей секунды) оксидная пленка толщиной в 20—30°А.

Опыты пассивирования порошка ферросилиция при 600—700° в течение одного часа показали, что выделение водорода в обмазке с пассивированным феррокремнием снижается довольно сильно, хотя полностью и не прекращается. Повышение температуры пассивирования и увеличение продолжительности не снизило активности ферросилиция в той степени, в которой это необходимо для полного уничтожения выделения водорода, и мы вынуждены были идти по другому пути—повышению модуля Na_2O от SiO_2 .

При пассивировании, повидимому, пленка SiO_2 увеличивается в толщину весьма незначительно, по крайней мере заметить утолщение пленки по увеличению веса порошка после пассивирования не удалось.

Как показали опыты, в случае применения стекла с модулем 2,9—3,2 выделение водорода не наблюдается совершенно. Повышение модуля жидкого стекла в лабораторных условиях осуществлялось следующим образом: из стекла, действием на него соляной кислоты, выделялся гель. После промывки он растворялся в жидком стекле (при нагревании на водяной бане) в необходимом количестве. Так удавалось получить стекло с модулем 3,4—3,6.

С целью повышения ионизации мы применяли в некоторых опытах калийное растворимое стекло (K_2O от SiO_2) путем растворения геля кремнекислоты в растворе едкого калия. Из диаграммы состояния $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ следует, что температура плавления $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ равна 1090°, $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ — 874°. Совершенно иная закономерность наблюдается в системе $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$.

$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ плавится при 980°, а $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ — при 1030°. Но эвтектики $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ и $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ плавятся при достаточно низких температурах 790 и 570°. Последнее обстоятельство весьма важно, так как обмазка для чугунных электродов должна быть более легкоплавкой, чем для электродов стальных. С другой стороны, это дает возможность при обмазке чугунных электродов ориентироваться на шлак весьма простого состава, так как при окислении части ферросилиция, не перешедшего в расплавленный металл, в жидкой обмазке увеличивается количество SiO_2 и температура плавления шлака до содержания в нем 84% SiO_2 (эвтектика $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2$) понижается, оставаясь низкой еще и при содержании 87% SiO_2 (880°).

Конечно, в расплавившуюся обмазку переходит кроме того и часть окислившегося железа (из ферросилиция и, вероятно, с электрода), но его влияние на изменение температуры плавления шлака не будет решающим.

В тройной системе $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 - \text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ температура плавления эвтектики из $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, эгирита ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) и кварца, отвечающей весовым процентам:

$$\begin{aligned}\text{SiO}_2 &= 72,9\% \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 4,2\% \\ \text{Na}_2\text{O} &= 23,7\%,\end{aligned}$$

равна 760°.

В ферросилиции соотношение между содержанием SiO_2 и Fe 4:1.

Принимая во внимание большую активность кремния по отношению к кислороду, содержание Fe_2O_3 вряд ли можно ожидать больше 4—5% (это подтвердилось и анализом шлака) и следует считать, что железо не повысит сильно температуру плавления шлака, образующегося при плавлении нашей обмазки.

Принимая во внимание вышеизложенное, мы остановились на растворимом натровом стекле с модулем 3,0 для изготовления всех образков для стальных и чугуновых электродов.

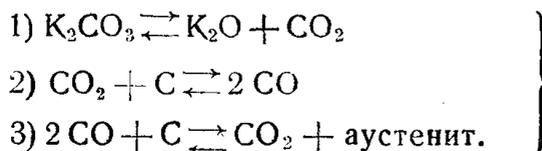
Одной из легирующих составных частей обмазки является ферросилиций. Он легирует стальной электрод кремнием и восполняет убыль выгорающего кремния в чугуновом электроде.

Вторым легирующим элементом, выполняющим аналогичную роль, является углерод, который можно взять в виде графита, древесного угля или в виде карборунда. В последнем случае карборунд (SiC) будет легировать шов одновременно и кремнием. В том и другом случае часть кремния переходит в сплав, часть, сгорая в SiO_2 , растворяется в шлаке. Углерод, сгорая, уходит в атмосферу в виде CO или CO_2 , а другая часть легирует сплав.

В шлак из сгорающего электрода могут переходить окислы марганца, железа, кремния. Но применение толстых образков почти исключает какое-либо заметное окисление электрода.

Поэтому, окончательно, шлак наших образков состоит из Na_2O , Fe_2O_3 и SiO_2 . Это очень хорошо, так как такой шлак легко рассчитать на основании имеющихся экспериментальных данных. В качестве легирующей углеродом составной части обмазки, как указано, можно принять графит или древесный уголь. Графит был бы вполне пригоден для этой цели, но его слабая реакционная способность заставляет в некоторых случаях предпочесть порошок древесного угля. Порошок этот содержит громадные количества адсорбированных газов, которые могут выделяться при сушке и плавлении обмазки и давать те же неприятности, как и водород, о котором уже говорилось. Чтобы лишить угольный порошок до некоторой степени способности поглощать газы, а затем их выделять, мы применили следующую обработку этого порошка: порошок варится в течение 3 часов в 20% растворе поташа (K_2CO_3) в воде. После вываривания порошок переносится на фильтр, а затем сушится в сушильном шкафу при 120° и потом вновь размальевается. Как показал опыт, такой порошок содержит очень мало газов и их почти не поглощает. С другой стороны, оставшийся в порах угля поташ значительно повышает его активность (способность науглероживать).

Взаимодействие поташа и угля обеспечивает получение атмосферы, содержащей газ, очень хорошо цементирующий железо, в соответствии со следующими реакциями:



Присутствие K_2CO_3 благоприятно влияет также на ионизацию дугового пространства, так как поташ является очень хорошим ионизатором.

Обмазки, содержащие в своем составе так обработанный древесный уголь, не нуждаются в добавке ионизаторов (мел, мрамор и т. п.). Дуга горит совершенно спокойно и весьма легко зажигается. В случае применения графита, вместо древесного угля, необходимо вводить мрамор в качестве ионизатора. Мрамор лучше мела, так как обмазка с мрамором

менее пориста, чем с мелом. Если есть возможность, то можно рекомендовать часть натронного стекла в обмазке заменять калийным, что обеспечивает чрезвычайно хорошую ионизацию. Одновременно присутствие K_2O в шлаке снижает температуру плавления последнего, что (как мы своевременно отмечали) при сварке чугуна имеет очень большое значение.

Температура плавления чугунного электрода 1200—1300°.

Температура плавления обмазки должна быть несколько ниже (1000°). Довольно трудно сказать, что сильнее реагирует в процессе науглероживания металла—жидкий металл-жидкий шлак или жидкий металл-газовая фаза. Кстати, температура жидкого металла, проходящего вольтовую дугу, не так уже велика; для стальной капли она равна 1600—1700°.

О легировании

Легированные элементы из обмазки переходят в металл электрода. Мы не имеем твердых опытных, а тем более теоретических данных количественной (а иногда даже и качественной) стороне явления.

Основательных, заслуживающих полного доверия исследований по этому вопросу не опубликовано ни в советской, ни в иностранной литературе. Существующие заграничные данные и приводимые составы обмазок ненадежны. У отдельных авторов есть кое-какие указания о коэффициенте перехода легирующих элементов из обмазок в шов, но они несистематичны, случайны и ими пользоваться поэтому крайне затруднительно.

В нашу задачу не входило проводить систематические исследования, определяя коэффициент перехода наиболее важных для нас элементов—кремния и углерода из обмазки в шов, но некоторые теоретические соображения и опытные данные по этому вопросу привести необходимо.

Переход углерода из обмазки в металл плавящегося электрода возможен как из твердой фазы (графит, древесный уголь, сажа), так и из газообразной.

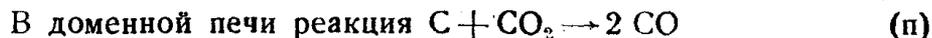
Непосредственное соприкосновение углерода обмазки с жидким металлом расплавленного электрода возможно, но затруднено жидким шлаком, в котором углерод находится в виде более или менее тонкой взвеси. Отдельные частицы углерода при этом, очевидно, изолированы от металла расплавленным шлаком, поэтому много вероятнее переход углерода в шов из газовой фазы.

Углерод имеет высокую температуру кипения (4500°K). Поэтому в ходе доменного процесса при свойственных этому процессу температурах порядка в среднем 1500° упругость паров углерода, насыщающих пространство, ничтожно мала и газообразный углерод никакой существенной роли не играет. Температура некоторых мест в газовой фазе дугового сварочного фокуса доходит до 6000°K, но температура стали, расплавленной и проходящей через газовую фазу в виде капель, не превышает 2100°K и во всяком случае не может превысить температуры кипения железа (3500°K.) Поэтому в случае дуговой сварки никак нельзя игнорировать перенос углерода из обмазки в металл через газовую фазу, в состав которой входят пары углерода.

Кусочки графита, проходя зоны сварочного фокуса, имеющие температуру 6000°K, испаряются, и пары углерода конденсируются на наиболее холодных местах сварочного фокуса—каплях расплавленного железа. Правда, углерод обладает весьма значительной теплотой парообразования (10800 кал/г), его испарение снизит температуру газовой фазы и вряд ли можно ожидать большого количества испарившегося углерода, тем более, что при низшей температуре кипения 3500°K и меньшей теплоте парообразования 1320 кал/гр роль паров железа при образовании шва

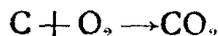
невелика и стальной шов образуется не за счет конденсации газовой фазы, а за счет переноса железа каплями.

Остается цементация жидкого металла за счет реакции:



устанавливается при работе на древесном угле при $t^\circ = 750 - 800^\circ$, а при работе на коксе при $900 - 950^\circ$.

В поверхностных слоях расплавленной обмазки идет одна реакция:



в глубине другая: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2 \text{CO}$.

Окись углерода, попадая в газовую фазу, осуществляет науглероживание расплавленного железа.

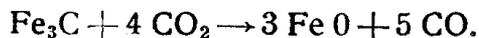
Графит в сравнении с коксом обладает меньшей реакционной способностью по отношению к кислороду. Активность (реакционная способность) древесного угля, кокса и графита относятся как: 90 : 20 : 5 или 18 : 4 : 1.

За меру активности принимали степень восстановления окислов при 1000° по истечении одного часа [8].

Вследствие пониженной реакционной способности графита реакция (п) будет, вероятно, идти при более высокой, чем 950° , температуре.

Всякое дополнительное введение в сварочный фокус одновременно с углеродом веществ, выделяющих углекислоту (при нагревании), именно поташа, соды, будет способствовать получению дополнительных количеств углекислоты и облегчать процесс науглероживания.

При высоких температурах, если в газовой фазе имеется хотя бы небольшое количество углекислоты, идет реакция:

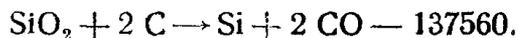


Кривая равновесия для этой реакции идет параллельно оси температур при нулевом содержании углекислоты в газовой фазе.

Трудно ожидать ста процентов окиси углерода в газовой фазе сварочного фокуса, окруженной со всех сторон кислородом воздуха, а поэтому приходится предполагать, что науглероживание идет не в зоне очень высоких температур, а в самой жидкой ванне шва, при температурах, близких к температуре кристаллизации шва.

Весьма интересен вопрос о переходе кремния из обмазки в шов. Переход кремния, очевидно, возможен главным образом из жидкой фазы (расплавленный ферросилиций). Кремний имеет большое сродство с кислородом и образует с кислородом SiO_2 с выделением громадного количества тепла. Опыт показывает, что очень большое количество кремния из обмазки уходит в шлак в виде SiO_2 .

Но, с другой стороны, имеется реакция прямого восстановления кремния:



В доменной печи эта реакция идет слабо, так как слишком низки температуры.

Вычисляя температуру в газовой фазе, при которой эта реакция может идти, получаем:

$$\lg P_{\text{CO}} = -\frac{14912}{T} + 1,75 \lg T - 9,6610^{-4} T + 3,5, \text{ полагая } P_{\text{CO}} = 1 \text{ атмосфере}$$

$$T \cong 2050^\circ.$$

При этой температуре начинается реакция восстановления, которая идет тем энергичнее, чем выше температура. Таким образом, можно считать, что переход кремния из обмазки в шов осуществляется непосредственно растворением кристалликов ферросилиция в расплавленной стали, а также из восстановленного углеродом кремнезема обмазки. В последнем случае существенное значение имеет содержание углерода в покрытии и состав газовой фазы в отношении содержания окиси углерода и углекислоты.

Это обстоятельство затрудняет выработку методики определения коэффициента перехода углерода и кремния из обмазки в шов, так как на переход кремния в металл существенное влияние оказывает углерод, его содержание как в расплавленной обмазке, так и в газовой фазе.

Влияет также углерод, растворенный в металле, так как он восстанавливает приходящую с ним в соприкосновение окись кремния. С другой стороны, кремний, поглощая кислород в сварочном фокусе, предохраняет от выгорания углерод.

Коэффициент перехода кремния из обмазки в шов меняется в зависимости от колебания в обмазке содержания углерода, и наоборот, коэффициент перехода углерода зависит от содержания в обмазке кремния.

Все-таки мы сделали попытку определить, как влияет содержание кремния и углерода в обмазке на содержание их же в шве.

Мы приготовили ряд образцов с меняющимся содержанием ферросилиция при постоянном содержании углерода и с неизменным содержанием углерода и переменным—ферросилиция. Кроме того, была приготовлена обмазка с графитом и такая же почти по составу с вываренным в растворе поташа древесным углем.

В сварочном фокусе дуги, которую дает электрод, покрытый обмазкой с древесным углем, вываренным в растворе поташа, должно иметь место выделение углекислоты за счет распада поташа.

Последнее обстоятельство приведет к повышению содержания окиси углерода в газовой фазе и лучшему науглероживанию металла электрода.

Данные обмазки, как и все окончательно принятые нами впоследствии обмазки, готовились на натриевом растворимом стекле с модулем 3,0—3,2. В качестве ионизирующей добавки в обмазки вводился мрамор.

Для химического анализа брались верхние слои шва (на глубину 3 мм от поверхности шва). Это делалось с целью исключить влияние материала той чугунной плитки, на которую производилась наплавка.

Стальной электрод имел толщину 4 мм, слой обмазки наносился в два приема и имел в толщину 1 мм на сторону. Сила переменного тока при сварке держалась около 180 А.

Чугунный электрод имел диаметр 5 мм, слой обмазки был толщиной 1,2 мм на сторону. Сила переменного тока колебалась около 200 А.

Во время опыта следили, чтобы дуга была постоянной длины и скорость сварки не менялась.

Химический состав стального электрода

С%	Si%	Mn%
0,11	0,08	0,45

Физический состав чугунного электрода

С%	Si%	Mn%
3,2	6,7	—

При изменении содержания одной из составных частей покрытия (скажем углерода) меняется и содержание другой (кремния). Действие же их проявляется совместно.

Правильнее было бы, не меняя содержания углерода, изменять содержание кремния, а общий баланс поддерживать введением инертных добавок. Но тогда по закону действующих масс легирующее действие добавки, имеющейся в постоянном количестве, будет все-таки переменным. А самое главное, активность обоих действующих легирующих элементов будет искусственно снижена вследствие уменьшения их концентрации по сравнению с нормальной обмазкой.

Особенно это скажется в нашем случае, когда в обычной, принятой нами обмазке содержание ферросилиция и графита составляет в сумме около 70—80% от веса сухого покрытия. Чтобы не уменьшать активность обмазок в наших опытах, мы в некоторых случаях вынуждены были менять и содержание второго исследуемого компонента покрытия. Результаты опытов даны в табл. 5 и на фиг. 4, 5, 6, 7.

После ряда предварительных опытов, когда выяснилось, что карборунд менее активен, нежели ферросилиций, и выяснилось, что порошок древесного угля, обработанного карбонатом, активнее графита, было изготовлено девять обмазок различного состава. Три из них представляют собой различные варианты в соотношениях между древесным углем и ферросилицием; три между графитом и ферросилицием; три между карборундом и графитом (табл. 4).

Таблица 4

Варианты составов обмазок (в процентах)

1	Графит	50	4	Графит	20	7	Уголь	50
	Ферросилиций	40		Карборунд	70		Ферросилиций	45
	Мрамор	10		Мрамор	10		Мрамор	5
2	Графит	30	5	Графит	10	8	Уголь	30
	Ферросилиций	60		Карборунд	80		Ферросилиций	65
	Мрамор	10		Мрамор	10		Мрамор	5
3	Графит	60	6	Графит	30	9	Уголь	70
	Ферросилиций	30		Карборунд	60		Ферросилиций	25
	Мрамор	10		Мрамор	10		Мрамор	5

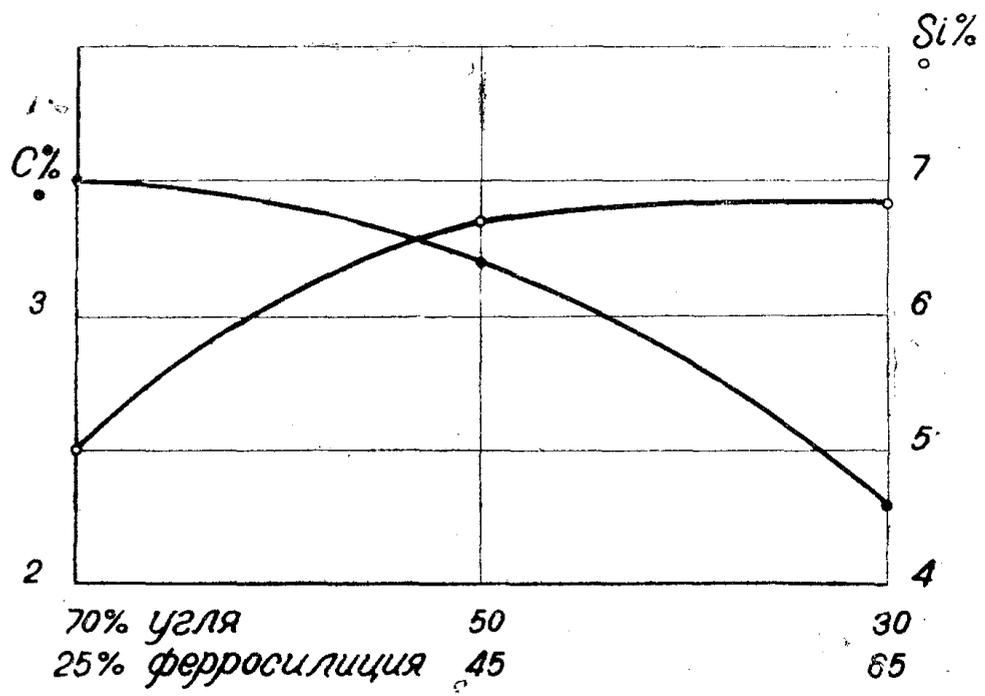
Кроме этих двух составных частей, во все девять обмазок вводился мрамор в количестве 10 и 5%. 5% мрамора вводилось в обмазки с древесным углем, обработанным по нашему способу карбонатом калия. Так обработанный древесный уголь являлся дополнительным ионизатором, и поэтому количество мрамора в некоторых обмазках уменьшено вдвое.

В ходе опытов выяснилось, что обмазка с ферросилицием и древесным углем давала хорошие результаты как защищающая и частично легирующая чугунные электроды и как легирующая для стальных.

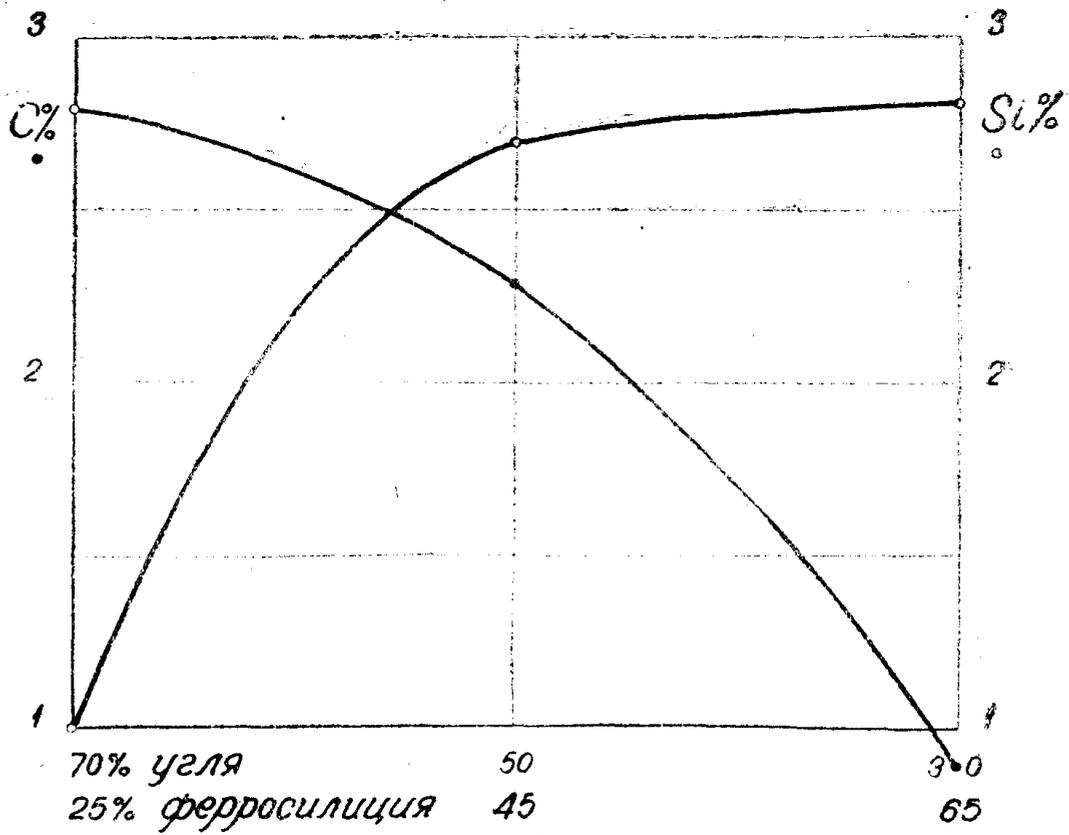
Количество растворимого стекла в обмазках 25% от веса сухого покрытия.

В процессе сварки рекомендуется держать короткую дугу.

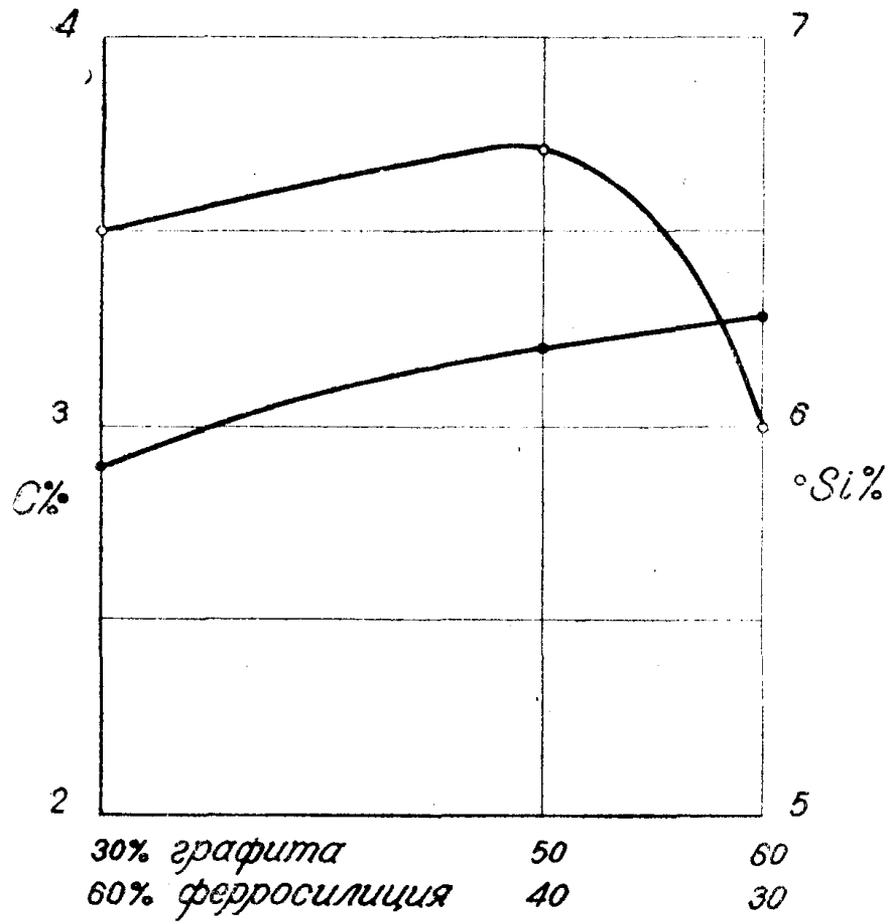
Толщина слоя обмазки 1,2 мм на сторону для чугунного электрода диаметром 5 мм и 1 мм на сторону для стального электрода диаметром 4 мм.



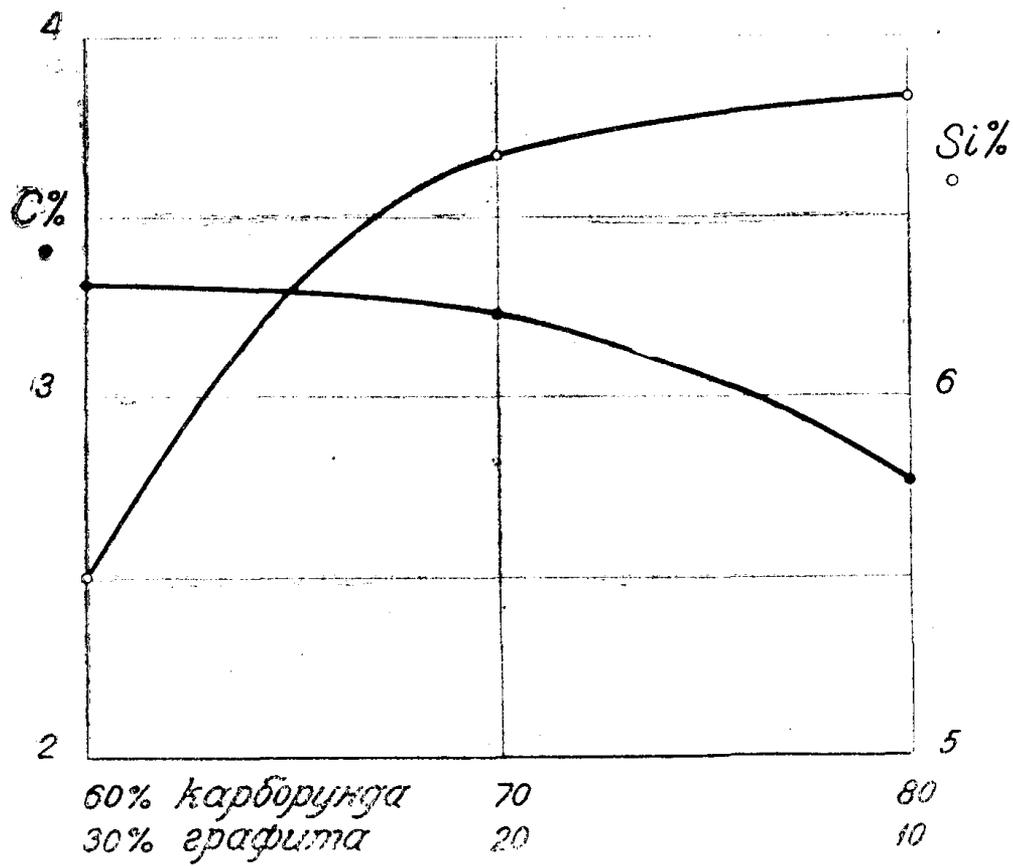
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

Наплавки, которые делались специально для химического анализа, были трехслойными, причем для анализа пробы брались из третьего слоя. Несколько контрольных образцов было наварено на медных пластинах для того, чтобы получить достаточно чистую наплавку и исключить влияние основного материала.

В табл. 5 приведены данные химического анализа наплавки, которые осуществлялись в случае применения обмазки того или другого варианта состава.

Таблица 5

А	Обмазка			Шов	
	Ферросилиций	Графит %	CaCO ₃ %	Si%	C%
1	60	30	10	6,5	3,3
2	40	50	10	6,7	3,3
3	30	60	10	6,1	2,9
Б	Карборунд %	Графит %	CaCO ₃ %	Si %	C%
1	60	30	10	5,5	3,3
2	70	20	10	6,7	3,2
3	80	10	10	6,8	2,8
В	Ферросилиций	Уголь %	CaCO ₃ %	Si%	C%
1	25	70	5	5,0	3,5
2	45	50	5	6,7	3,2
3	65	30	5	6,8	2,3

Три варианта обмазок (1, 2, 3), состоящих из ферросилиция, графита и мрамора, объединены под литерой А.

Три варианта обмазок из карборунда, графита и мрамора объединены под литерой Б.

Три варианта из древесного угля, ферросилиция и мрамора—под литерой В.

Обмазка состава: графит, карборунд, мрамор в трех указанных в табл. 5 вариантах составных частей применялась при сварке чугунами электродами.

По данным состава обмазок и результатам химического анализа наплавки, соответствующих этим обмазкам, были построены кривые, представленные на фиг. 4, 5, 6, 7.

1. Кривые, фиг. 4, характеризуют переход основных легирующих элементов—углерода и кремния—из обмазки состава: угля древесного 70%, ферросилиция 25%, мрамора 5% в шов при сварке чугунами электродами, состава 6,7% Si и 3,2% C.

2. Кривые, фиг. 5, характеризуют переход углерода и кремния из обмазки того же состава: угля древесного 70%, ферросилиция 25%, мрамора 5% в шов, но только уже при сварке стальными электродами состава: C=0,10%, Si=0,08%.

3. Кривые, фиг. 6, показывают переход углерода и кремния из обмазки состава: графита 30%, ферросилиция 60%, мрамора 10% в шов при сварке чугунами электродами указанного выше состава (чугунные электроды во всех трех случаях имели один и тот же химический состав).

4. Кривые, фиг. 7, соответствуют переходу углерода и кремния из обмазки состава: карборунда 60%, графита 30%, мрамора 10% в шов при сварке чугунами электродами.

На основе построения этих кривых, мы нашли оптимум для состава обмазок, во всех четырех случаях взяв в качестве характеристики состава той или иной обмазки абсциссу точки пересечения кривых, характеризующих изменение содержания углерода и кремния в шве.

Так, для третьего случая, фиг. 6, оптимальный состав обмазки: графита 55%, ферросилиция 36%, мрамора 9%.

Из кривых, представленных фиг. 4, оптимальный состав обмазки соответственно будет: угля древесного 53%, ферросилиция 42%, мрамора 5%.

В результате анализа кривых фиг. 7 получается оптимальный состав обмазки следующего состава: графита 22%, карборунда 67%, мрамора 11%.

В результате анализа кривых фиг. 5 оптимальный состав обмазки для стальных электродов тот же, что и для чугуна: угля древесного 53%, ферросилиция 42%, мрамора 5%.

Результаты металлографического исследования швов, наплавленных чугуном электродом состава—6,7% Si и 3,2% C на основной материал химического состава:

C%	Si%	Mn%
2,80	2,12	0,40

Микроструктура основного материала: перлитная металлическая масса плюс включения пластинчатого графита.

1. Наварка осуществлялась чугуном электродом с применением обмазки литеры А.

Микроструктура наплавленного металла: ферритная основная металлическая масса и включения крупнопластинчатого графита.

2. Шов наплавлен чугуном электродом с применением обмазки литеры Б.

Микроструктура наплавленного металла феррит+небольшое количество перлита+графит пластинчатого строения.

3. Результат наплавки чугуном электродом, покрытым обмазкой литеры В.

Микроструктура наплавленного металла представляет собой ферритную основную металлическую массу дендритного строения, очертания ферритных дендритов заметны за счет включений эвтектического графита.

4. Результат наплавки стальным электродом с обмазкой литеры В.

Микроструктура наплавленного металла перлит+ледебуритный цементит (шов отбеленный).

Выводы

Если взять высококремнистый чугунный электрод, то весьма вероятно возможность сварки таким электродом без обмазки, так как выгорающий кремний дает достаточно большое количество (7 калорий на грамм) тепла. Если позаботиться об ионизации, то сварка голым электродом вполне возможна. Мы пришли к выводу, что обмазки для сварки чугуна чугуном же электродом должны предохранять от выгорания основные эле-

менты (кремний и углерод), ионизировать дугу и при достаточной легкоплавкости давать шлак, защищающий до некоторой степени шов от потери тепла. Но последнее обстоятельство (защищающее от охлаждения действие шлака) нельзя и не стоит переоценивать.

Основой шлака, получающегося в результате сгорания обмазки, является окись натрия и окись кремния.

Учитывая это обстоятельство и ряд других моментов, мы пришли к изложенной ниже рецептуре обмазок.

Для облегчения лучшей защиты от проникновения водорода рекомендуется вводить в состав обмазок органические вещества (крахмал, декстрин, слегка обугленные древесные опилки).

Прибавкой в обмазку CaCO_3 (или что то же CaO , так как при 940° идет реакция $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) не следует злоупотреблять. Лучше применять какой-либо другой ионизатор. Дело в том, что из диаграммы $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ следует, что лишь до содержания 5% CaO температура плавления шлака лежит в нужных пределах (не выше 900°). И лишь при большом содержании SiO_2 (свыше 80%) добавка CaO не повышает сильно температуры плавления.

Принимая во внимание приведенные данные, можно дать следующие соображения о составлении обмазок для чугунных электродов.

Основой шлака лучше всего выбрать систему—окись натрия—окись кремния. При возможности достать (или приготовить) калийное растворимое стекло следует прибавить его к натриевому стеклу в количестве 10—20% с целью снижения температуры плавления шлака и лучшей ионизации. Прибавка в качестве ионизатора CaCO_3 при отсутствии калийного стекла не вызывает вообще возражений, но лучше применять мрамор, нежели мел. Мрамор делает обмазку (по сравнению с мелом) более плотной и шлак менее пузыристым.

Таким образом, необходимо базироваться на тройной системе: $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ при проектировании обмазки.

Неизбежно присутствие FeO (или Fe_2O_3) большого влияния на свойства шлака не окажет. Как показывает анализ, в шлаке бывает не более 1—3% железа.

2. Для легирования шва кремнием лучше применять обычный ферросилиций. Его (в окончательно просеянном порошке) следует пассивировать нагреванием при $500 - 600^\circ$ в течение 1 часа.

Карборунд легирует шов кремнием и углеродом слабее, как показали опыты других авторов с электродами из стальной проволоки, но вместе с тем и слабее реагирует с NaOH . Поэтому его применение можно рекомендовать в том случае, когда мы не располагаем высокомодульным стеклом и приходится довольствоваться стеклом, обычно применяемым для изготовления обмазок (с модулем 2,8).

3. Для легирования шва углеродом лучше всего применять приготовленный по нашему способу древесный уголь.

Благодаря содержанию K_2CO_3 такой уголь очень хорошо науглероживает шов и прекрасно ионизирует дугу без дополнительного введения CaCO_3 в качестве ионизатора.

Графит, обычно применяемый в подобных обмазках, не обладает этими преимуществами, но обмазки с графитом также достаточно удовлетворительны.

4. Особой необходимости защищать чугунный шов от азота в случае применения электрода с толстой обмазкой нет, но для целей профилактики можно прибавлять в обмазку 1—2% крахмала или декстрина.

5. Легирование шва никелем при помощи введения в обмазку никеля возможно, но рациональнее вводить никель в состав электродов, так как в последнем случае угар никеля будет много меньше.

6. На основании серии опытов мы можем рекомендовать следующие обмазки для чугунных электродов:

Обмазка № 1

Графит 6 весовых частей
Ферросилиций 4 весовых части
Мрамор 1 весовая часть

Обмазка разводится на стекле с модулем 3,0.

Обмазка № 2

Графит 2 весовых части
Карборундум 6 весовых частей
Мрамор 1 весовая часть

Обмазка разводится на стекле с модулем 2,8.

Обмазка № 3

Древесный уголь 10 весовых частей (уголь, обработанный по нашему способу)
Ферросилиций 8 весовых частей
Мрамор 1 весовая часть

Обмазка разводится на стекле с модулем 3,0.

Некоторые результаты экспериментальных наплавов

С целью избежать излишней громоздкости данной главы здесь помещены описания только некоторых наплавов.

Режим и технология сварки

Сварка чугунными электродами, покрытыми обмазками составов, указанных в предыдущей главе, производилась на сварочном трансформаторе.

Оптимальная сила тока была подобрана для данного электрода и данной обмазки опытным путем и соответствовала в среднем 200 А.

При отливке электродов в земляные формы их толщина по длине менялась в пределах от 5,0 до 5,5 мм. Но в процессе сварки это мало сказывалось на той средней силе тока, которая была выбрана.

Применяемые нами обмазки обладали достаточно хорошим стабилизирующим влиянием на дугу. Вследствие этого зажигание дуги происходило без всяких затруднений и даже неопытный сварщик мог расплавить целый электрод без перерыва. Особенно хорошо держалась дуга при употреблении в обмазке частично калийного растворимого стекла или порошка древесного угля, вываренного в поташе.

Отлитые для экспериментальной сварки пластинки были простроганы на токарном станке. Толщина пластинок 15—20 мм. Для наплавки прострагивались V и U-образные канавки глубиной 12 мм.

Описание экспериментальных наплавов

Эксперимент 1-й. Основной материал—серый чугун следующего химического состава.

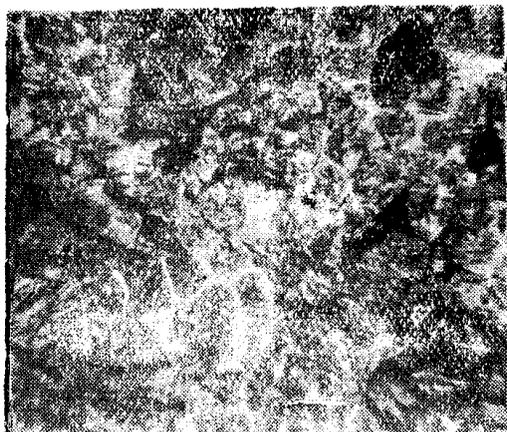
Собщ. ‰	Si‰	Mn‰	S‰	P‰
2,80	2,12	0,40	—	—

Микроструктура основного материала (фиг. 8) представляет собой перлитную основную металлическую массу с включениями графита крупнопластинчатого строения и островками изолированных включений ледебуритного цементита.

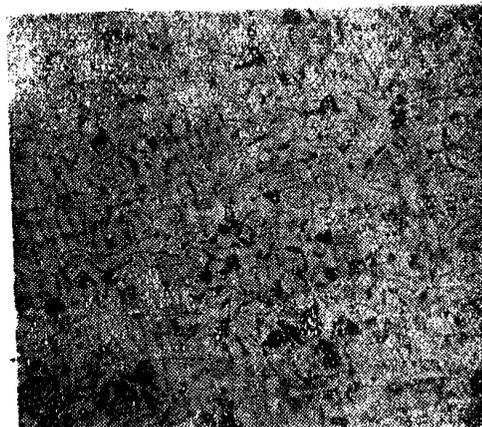
Наварка осуществлялась электродом состава:

$$C = 2,9\% \quad Si = 6,7\%$$

Микроструктура материала электрода представляет собой феррит + пластинчатый графит (фиг. 1).



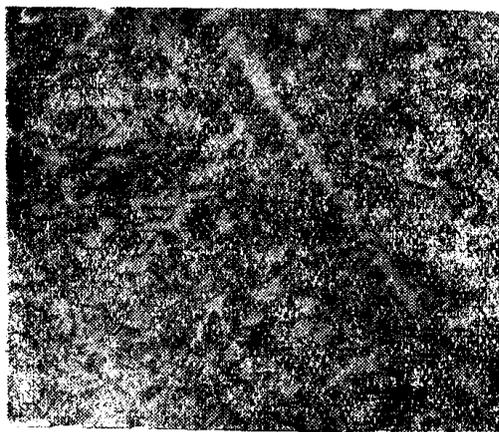
Фиг. 8



Фиг. 9

Электрод покрывался обмазкой следующего состава:

1. Древесного угля 5 частей (предварительно обработанного K_2CO_3).
2. Ферросилиция 5 "
3. Мела 1 "
4. Жидкого стекла 3 " (сухой остаток).



Фиг. 10



Фиг. 11

Применяемое для изготовления данной обмазки жидкое стекло имело модуль 3,0. Микроструктура наплавленного металла—феррит плюс эвтектический графит (фиг. 9, 10, 11, 12).

В месте перехода одного слоя в другой, охлажденный более ускоренно по сравнению с первым, наряду с эвтектическим графитом, имеется обычный пластинчатый графит.

При малом увеличении (фиг. 13) в структуре наплавки хорошо заметны ясно выраженные ферритные дендриты, между осями которых вкраплен эвтектический графит. В месте перехода слоя наплавки в слой основного чугуна (зона провара) заметны включения ледебуритного цементита, которого в этом месте меньше, чем в структуре основного чугуна (фиг. 14,15).



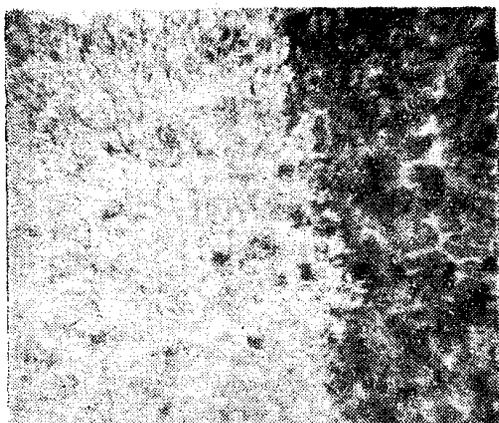
Фиг. 12



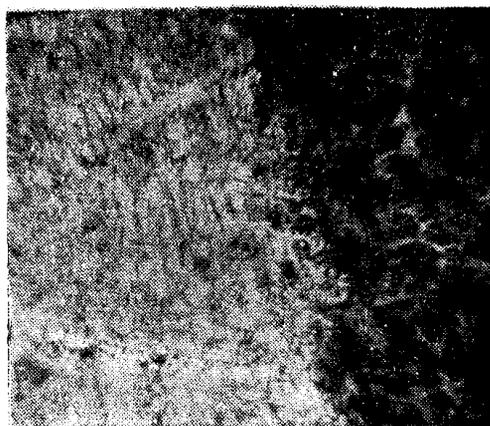
Фиг. 13

Микроструктура переходной зоны (при увеличении 25) представлена на фиг. 16.

На основании структурного анализа можно сделать заключение, что наплавленный металл и металл переходной зоны обладают более высоки-



Фиг. 14



Фиг. 15

ми механическими свойствами, нежели основной чугун, в котором, как было описано выше, имеются включения ледебуритного цементита.

Микроструктура переходной зоны представлена фиг. 13, 17.

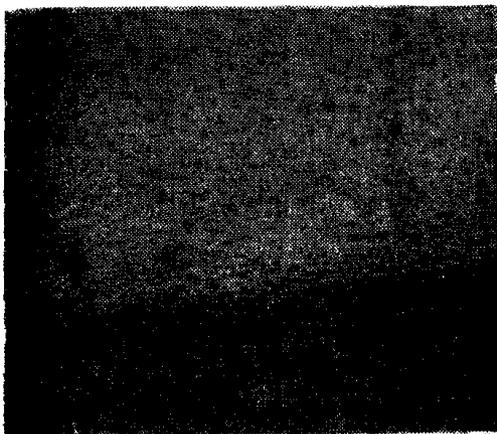
На фиг. 18 изображена та же структура при увеличении в 25 раз. Здесь можно различить более светлую часть — ферритную наплавку и темную — основной материал. Фиг. 19 представляет одновременно основной и наплавленный металл. В наплавке видны следы ферритных дендритов.

Наварка производилась переменным током при силе тока 250 А и плотности тока $9,9 \frac{А}{мм^2}$.

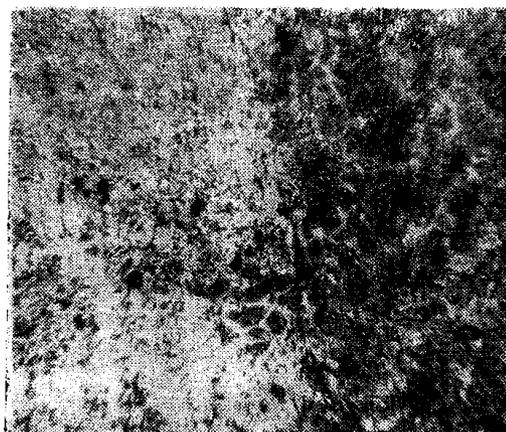
Дуга горела ровно, без обрывов, при достаточно легком зажигании. Анализ наварки показал следующее:

- 1) плотное соединение основного металла с наплавленным;

2) наплавленный металл плотный, с незначительным количеством шлаковых включений, без газовых пузырей;

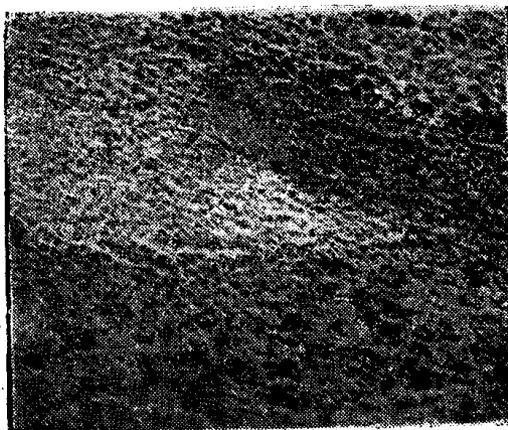


Фиг. 16

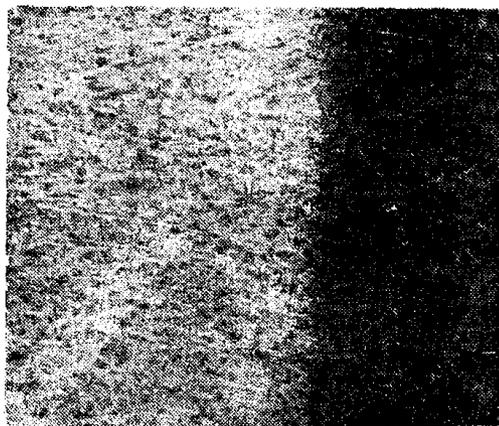


Фиг. 17

3) место наварки при хорошо выполненной наплавке по своим качествам (пластичности) безусловно превосходит качество основного металла. Результаты определения твердости:



Фиг. 18



Фиг. 19

основной материал $H_B = 150 - 180$
наплавка $H_B = 120$.

Эксперимент 2-й. Основной материал — серый чугун следующего химического состава:

C%	Si%	Mn%	S%	P%
2,53	4,23	0,36	0,01	0,006

Микроструктура основного материала — феррит и крупнопластинчатый графит, причем длина отдельных графитовых пластинок доходит до 1—2 мм (фиг. 20).

Наварка осуществлялась электродом состава:

Собщ %	Si ⁰ %	Ni%	Al ⁰ %
3,70	6,2	1,3	0,5

Микроструктура электрода представляет собой феррит с небольшим количеством перлита и графит (фиг. 2).

Повышенное содержание Ni в электроде почти совершенно не сказалось на структуре наплавки.

Повидимому, при достаточно большом содержании кремния нет никакого смысла добавлять никель; его благотворное влияние сказывается



Фиг. 20

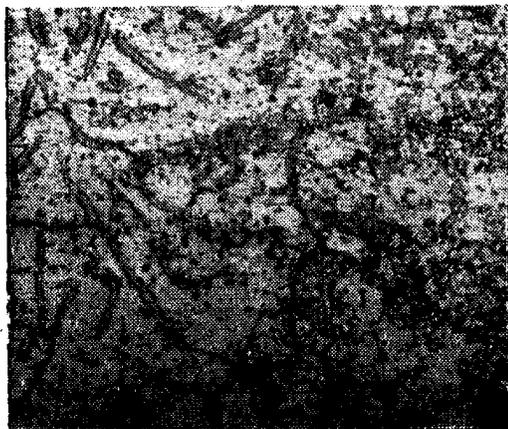
лишь при умеренном содержании кремния, когда графитизация чугуна идет за счет кремния и за счет никеля. В нашем же случае графитизация идет за счет кремния, и никель не оказал практически влияния на структуру наплавки. Наплавленный металл (фиг. 3) структурно представляет собой феррит + графит + эвтектический графит + пластинчатый графит + гнезда графита.

На фиг. 3 изображена структура наплавленного металла при увеличении 600.

Переход основного металла в наплавку (фиг. 22) ясно показывает разницу в структуре основного металла

и наплавки. При их принципиальной схожести (и в том и в другом случае мы имеем ферритный чугун) распределение и форма выделения графита различны.

Левая часть фиг. 21 изображает основной металл, правая—наплавленный. Заметен плавный переход одной структуры в другую (та же фигура).



Фиг. 21



Фиг. 22

Фиг. 23 изображает основной материал при увеличении 25.

Фиг. 24 соответствует переходной зоне, сфотографированной при малом (25) увеличении.

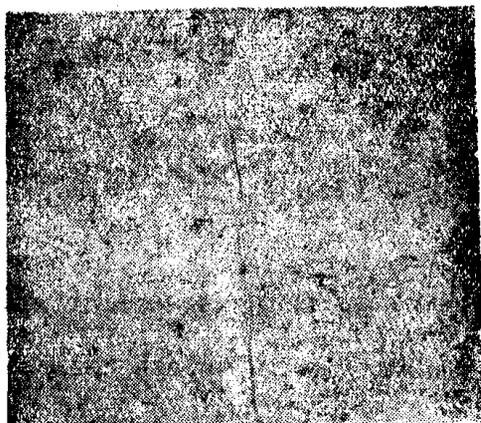
Сварка осуществлялась переменным током. Сила тока 225 А, при плотности тока 8 А/мм².

Электрод покрывался обмазкой состава:

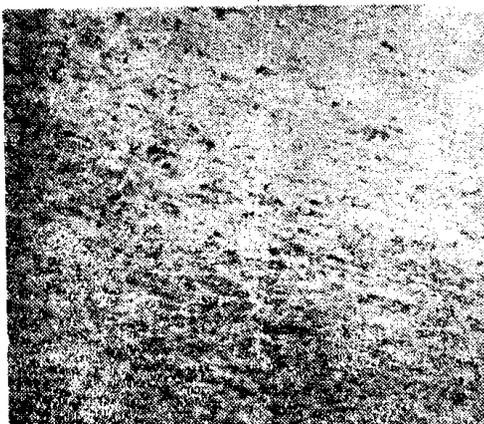
древесного угля	5 частей
ферросилиция	5 "
мела	1 "
жидкого стекла (сухого)	3 "

Анализ наварки показал следующее:

1. Достаточно плотное соединение основного металла с наплавленным.



Фиг. 23



Фиг. 24

2. Наплавленный металл плотный. Количество шлаковых включений чрезвычайно ограничено. Газовые включения отсутствуют.

Результаты определения твердости:
твердость основного металла $H_B = 137$,
твердость наплавки $H_B = 150$.

Эксперимент 3-й. Основной металл — серый чугун химического состава:

Собщ ⁰ / ₀	Si ⁰ / ₀	Mn%
2,62	2,89	0,39

Микроструктура основного материала (фиг. 25) представляет собой феррит + крупнопластинчатый графит + перлит, причем длина отдельных графитовых пластинок достигает 0,8—1,6 мм.

На фиг. 26 представлена структура основного металла при малом увеличении (25).

На пластинку чугуна указанного состава было наплавлено два валика электродами, различающимися по химическому составу, но покрытым одинаковой обмазкой. Одна из канавок пластинки, имеющей U-образную разделку, была заварена электродом состава: Si = 4,6% и Ni = 1,8.

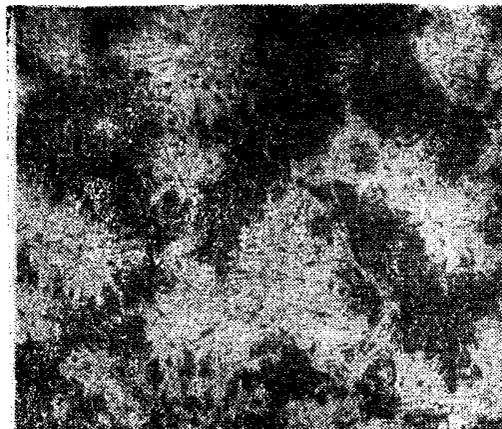
Микроструктура электрода — перлит, графит и небольшое количество включений ледебурита. При содержании кремния в материале электрода в количестве 4,6%, добавление никеля заметно благотворно влияет на

структуру в направлении измельчения графитных выделений, более полного распада связанного цементита, с образованием ферритной основы.

Наплавленный металл (фиг. 11) структурно представляет собой графитовую эвтектику с ферритной основной металлической массой.



Фиг. 25



Фиг. 26

Вблизи зоны влияния, кроме эвтектического графита, имеют место выделения графита в пластинчатой форме (фиг. 27).

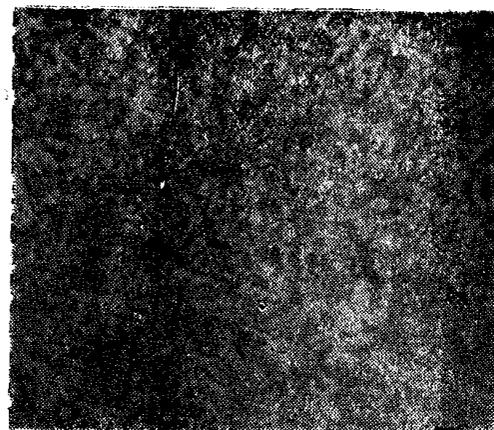
На фиг. 28 мы одновременно имеем возможность видеть сразу три зоны:

1. Зону основного металла.
2. Зону влияния.
3. Зону наплавленного металла.

Вторая U-образная канавка чугунной пластинки заваривалась электродом состава 4,8% Si без никеля.



Фиг. 27



Фиг. 28

Микроструктура электрода: перлит + феррит + графит пластинчатой формы.

Наплавленный металл структурно представляет дендритообразную форму выделения трех структурных составляющих: перлита, графита и феррита (фиг. 29, 30). Переходная зона представлена микрофотографией фиг. 31 и микрофотографией фиг. 32 при увеличении 25.

На фиг. 32 изображена структура наплавки, представляющая собой перлит и феррит (дендритного строения) и включения шарообразного графита.

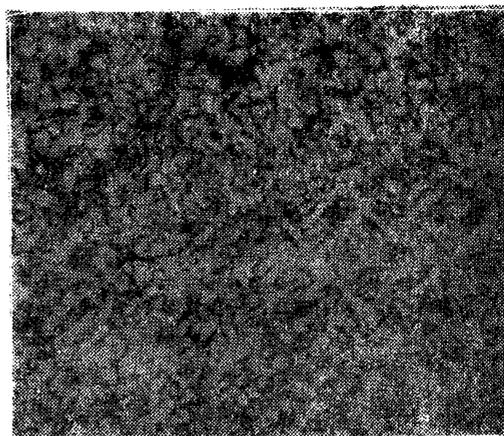
Как в первом, так и во втором случае электроды покрывались обмазкой состава:

Древесного угля 5 частей
 Ферросилиция 5 "
 Мела 1 "

Сварка осуществлялась переменным током при силе тока 240 А и плотности тока 8,7 А/мм².



Фиг. 29

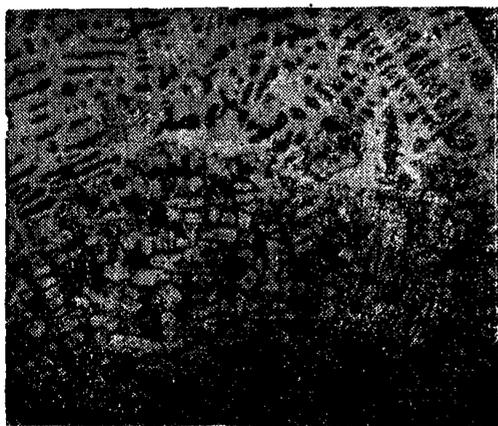


Фиг. 30

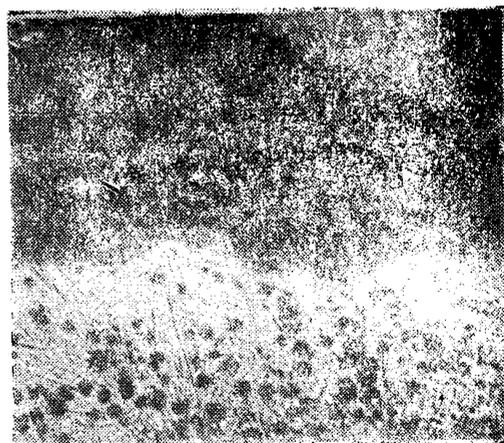
Дуга горела ровно, при достаточно легком зажигании. Плавление и стекание обмазки с электрода равномерное. Провар вполне удовлетворительный.

Анализ заварки показал следующее:

1. Плотное соединение основного металла с наплавленным.
2. Наплавленный металл достаточно плотный.



Фиг. 31



Фиг. 32

Шлаковых включений—незначительное количество при полном отсутствии газовых включений.

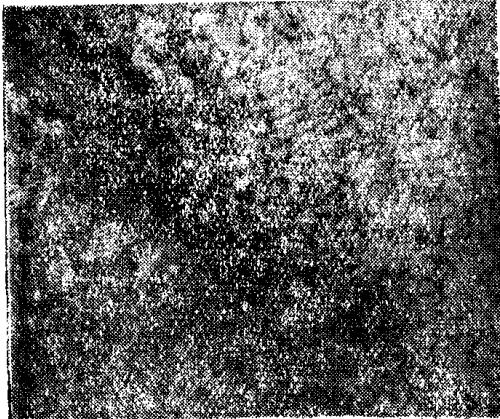
Эксперимент 4-й. Основной материал—серый чугун следующего химического состава:

C ⁰ / ₀	Si ⁰ / ₀	Mn ⁰ / ₀
2,48	1,53	0,32

Микроструктура основного материала — перлит и крупнопластинчатый графит.

По микроструктуре основной материал является перлитно-графитным чугуном.

Наварка осуществлялась электродами состава:



Фиг. 33

Co ⁰ / ₀	Si ⁰ / ₀	Al ⁰ / ₀
3,70	4,9	1,0

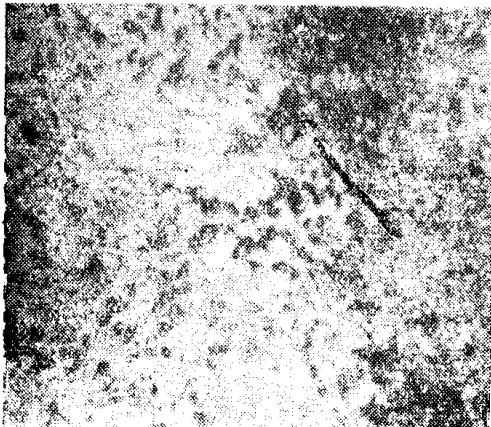
Микроструктура электрода представляет феррит с небольшим количеством перлита и графит в пластинчатой форме выделения.

Электрод покрывался обмазкой следующего состава:

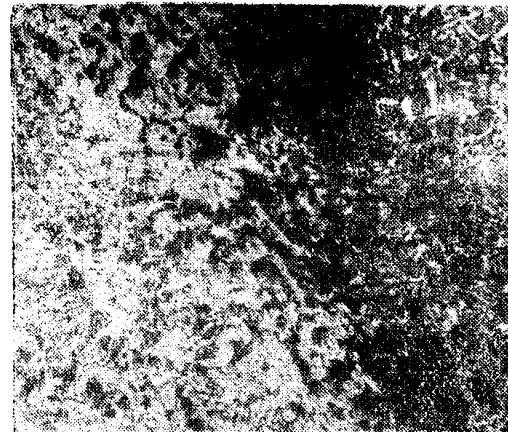
Древесного угля 5 частей
Ферросилиция 4 части
Мела 1 „

Применяемое для данной обмазки жидкое стекло имело модуль 3,8.

Микроструктура наплавленного металла — перлит, графит и некоторое количество цементита.



Фиг. 34



Фиг. 35

Переходная зона представле а на фиг. 33, 34, 35.

Заклучение и выводы

1. В результате данной работы можно рекомендовать сваривать перлитные и перлитно-ферритные чугуны электродом с большим содержанием кремния (5⁰/₀). Ферритные чугуны возможно сваривать ферритно-перлитным электродом с меньшим содержанием кремния (не менее 4⁰/₀), при этом получается отсутствие цементита в переходной зоне и плавный переход структур.

2. Сварку стальным электродом с карборундовой обмазкой рекомендовать нельзя.

3. Возможно рекомендовать сваривать ферритный чугун стальным электродом с обмазкой из ферросилиция, древесного угля, обработанного по нашему способу карбонатом калия.

4. Чугуны ферритно-перлитные и перлитные сваривать стальным электродом возможно, но это зависит от искусства сварщика и не всегда дает положительные результаты.

5. Применение стальных электродов с тонкой проволочной обмоткой и трехслойной обмазкой ожидаемого эффекта не дало.

6. При употреблении обмазок с ферросилицием и отчасти с карборундом необходимо обращать внимание на модуль жидкого стекла. Рекомендуем в среднем модуль 3,0—3,2.

При употреблении пассивированного ферросилиция возможен модуль 2,8—3,0.

7. В результате применения электродов, покрытых обмазками, состав которых мы рекомендуем, получается шлак, который достаточно легко вычисляется, причем необходимо иметь в виду, что состав шлака для стали и чугуна вследствие различных металлургических и физико-химических основ стали и чугуна должен быть различным.

8. Графитизация в металле шва вследствие высокой температуры расплавленной капли ($\sim 1800^\circ$) не зависит от наличия центров кристаллизации графита в жидком металле, как это имеет место в обычном чугуне, где перегрев порядка $1400\text{--}1500^\circ$ считается значительным.

9. Науглероживание стального электрода до чугуна проходит, вероятно, за счет действия газовой фазы, в виде СО и частично в виде паров углерода, но не в виде твердого графита, что и исключает готовые центры кристаллизации графита.

10. Коэффициент перехода легирующих элементов (углерода и кремния) из обмазки в шов неизвестен и систематических опытов в этом направлении не велось. Возможно определить коэффициент перехода углерода и кремния по отдельности, но когда углерод и кремний вводятся вместе, то картина будет иная в соответствии с законом действия масс.

11. Определены количественные данные при переходе некоторых легирующих составных частей обмазки (кремния и углерода) в шов для стальных и чугунных электродов.

На основании этих данных рекомендуем следующие рецепты обмазок:

1. Графита 55%	} для чугунных электродов.
Ферросилиция 36%	
Мрамора 9%	
2. Графита 22%	} для чугунных электродов.
Карборунда 67%	
Мрамора 11%	
3. Угля древесного 53%	} для стальных и чугунных электродов.
Ферросилиция 42%	
Мрамора 5%	

Во всех обмазках количество растворимого стекла (сухого) 25% от веса сухого покрытия.

12. Применение термита в обмазках для сварки чугуна никакого эффекта не дало.

13. Если в структуре шва появились включения ледебуритного цемента, то в случае если это возможно, мы рекомендуем применять терми-

ческую обработку шва, заключающуюся в отжиге с температуры 900° для полной графитизации.

14. Сварка чугуна с подогревом в 200—300° способствует более полной графитизации шва и получению в наплавке микроструктуры—феррита и графита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Пивоварский. Высококачественный чугун и физикометаллургические основы его изготовления, ОНТИ, 1932.
2. К. А. Еремин. Образование графита в чугуне, 1938.
3. Н. Ф. Болховитинов. Металловедение и термическая обработка, Машгиз, 1947.
4. Н. П. Дубинин. Отливка чугунных изделий ширпотреба в постоянных формах, Гизместпром, 1940.
5. Н. В. Гутковский. К теории системы железо-углерод, часть 1, 1914.
6. В. И. Ярхо. Холодная сварка чугуна чугунными электродами, Машгиз, 1940.
7. В. И. Ярхо. Холодная сварка чугуна по методу Ярхо, „Автогенное дело“, № 7, 1936.
8. И. А. Павлов. Металлургия чугуна, вып. 2, 1940.
9. К. К. Хренов и В. И. Ярхо. Технология дуговой сварки, Машгиз, 1940.