

УДК 621. 791.G21.73

Власов А. Ф., Макаренко Н. А.

**ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ СМЕСИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

Одной из главных задач, решаемых при совершенствовании сварочных и электрошлаковых процессов, является повышение их производительности и изыскание новых видов сырья для их осуществления. Одним из направлений решения данной задачи является использование дополнительных источников тепла (эффекта экзотермических реакций) путём введения в состав сварочных и наплавочных материалов экзотермических смесей [1–3].

Наряду с возрастанием при производстве сварных конструкций объема применения автоматической, особенно полуавтоматической сварки в среде защитных газов, ручная электродуговая сварка покрытыми электродами, из-за своей простоты и универсальности, все ещё является распространенным способом сварки как в нашей стране, так и за рубежом.

Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей промышленностью выпускается множество марок электродов, производительность которых довольно низка (коэффициенты наплавки и скорости их плавления не превышают, соответственно, 8,5–10,0 г/А·ч и 13–16 м/ч) [4, 5].

До настоящего времени одним из основных и наиболее эффективных способов повышения производительности ручной дуговой сварки является введение в состав покрытия электродов до 70 % железного порошка при одновременном увеличении толщины покрытия электродов. Наибольшая производительность ( $\alpha_n = 14–18$  г/А·ч) достигается при содержании в покрытии электродов 60–70 % железного порошка при коэффициенте массы покрытия в пределах 100–200 % [6, 7]. Однако удельный вес применяемых в нашей стране «высокопроизводительных» электродов (вследствие необходимости использования в этом случае источников питания с напряжением холостого хода величиной 80 В, дефицитности железного порошка, сложности обеспечения качественного их изготовления в поточных линиях «электродный пресс – конвейерная проколочная печь», возможности выполнения сварочных операций только в нижнем или незначительно наклонном положении и других причин) очень мал и составляет примерно 1 % от общего количества применяемых электродов.

При дуговом способе наплавки под слоем гранулированного флюса, предварительно насыпаемого на поверхность основного металла, создаются условия для увеличения доли основного металла в наплавленном (при наплавке электродными материалами типа проволоки, лент и др.) до величины 0,27–0,6 [8]. Специальные свойства наплавленного металла обеспечиваются за счет легирования [9, 10]: применения легированной проволоки или ленты в сочетании с плавленным флюсом; введения легирующих примесей через проволоку или ленту (порошковые проволоки и ленты); активированной проволоки в сочетании с плавленным флюсом; легирующего флюса (керамический флюс, механическая смесь ферросплавов в сочетании с низкоуглеродистой проволокой или лентой); введения легирующих компонентов в виде флюсовой присадки (в виде специальных прутков, лент, порошков или паст путем их расплавления низкоуглеродистым электродом под плавленным флюсом).

Известен также механизированный способ нанесения и легирования наплавленного металла с применением флюсов – смесей [11, 12], при котором флюс предварительно насыпается на поверхность основного металла. Данный способ не позволяет получить равномерность химического состава наплавленного металла из-за сепарации по удельной массе компонентов, входящих в их состав. Кроме того, глубина проплавления основного металла не может быть уменьшена, так как на сварочную ванну непосредственно действует давление дуги.

В электрошлаковых процессах возбуждение электрической дуги и наведение шлаковой ванны необходимого объема является ответственным моментом, особенно при сварке (наплавки) крупногабаритных изделий. В настоящее время на предприятиях при электрошлаковой

сварке деталей применяются две разновидности старта – «твердый» и «жидкий». При «твердом» старте расплавление рабочего флюса и наведение шлаковой ванны выполняется различными способами: применением металлической стружки и алюминиевого порошка [13], расположенных между электродом и дном кармана; расплавлением совместно с флюсом приваренных к расходному электроду пластин соответствующей конфигурации в дуговом режиме; применением электропроводного в твердом состоянии флюса АН-25 [14]; использованием прессованных экзотермических брикетов или самоплавящихся флюсовых смесей [15, 16]. Расход самоплавящихся флюсов обычно невелик и не превышает 2 % от массы рабочего флюса. Основная роль таких флюсов заключается в обеспечении начала расплавления флюса путем быстрого перехода от дугового к бездуговому процессу. При этом, на полное расплавление флюса тратится значительное количество времени, в результате чего снижается производительность печи. Из-за отсутствия в смесях легирующих элементов и небольшого количества окислы они не позволяют существенно снизить время на расплавление всего флюса и повысить выход годного металла.

Данному способу присущи следующие недостатки: нестабильное начало электрошлакового процесса, сопровождаемого частыми короткими замыканиями; неравномерное и длительное расплавление флюса; низкая производительность процесса.

Электрошлаковая сварка (наплавка) крупных заготовок осуществляется на печах бифилярного или трехфазного типа с использованием только «жидкого» старта путем сифонной заливки расплавленного за пределами печи флюса в нижнюю часть кармана. Однако, трудоемкость процесса сварки, с учетом времени расплавления флюса во флюсоплавильных печах, значительно выше по сравнению с «твердым» стартом.

Целью настоящей работы является повышение производительности дуговых и электрошлаковых процессов путем применения экзотермических смесей (флюсов), обеспечивающих дополнительный источник тепла и заданное качество металла шва или наплавленного металла.

Экзотермические смеси в данной работе представляют собой механическую смесь окислы и алюминиевого порошка, а экзотермические легирующие флюсы – механическую смесь окислы, алюминиевого порошка, легирующих элементов в виде ферросплавов или порошков и рабочего флюса (АНФ-6 или др.)

В работе [17] приведены результаты экспериментального определения экзотермического процесса при нагреве и плавлении электродов. Установлено, что при нагревании до 1000 °С электродного покрытия, содержащего свыше 35 % экзотермической смеси, экзотермический процесс протекает до образования электродной капли. При изменении содержания в покрытии электродов экзотермической смеси от 35 до 64 % прирост температуры в нем составил 1280 °С.

Проведенные исследования [18] показали, что повышение производительности ручной дуговой сварки, отсутствие или значительное снижение содержания в покрытиях электродов дефицитных компонентов, позволяет обеспечить путем применения в сварочных материалах экзотермических смесей.

При введении в электродное покрытие в соответствующих количествах окислы железа и элементов – раскислителей (экзотермической смеси) при его нагреве и плавлении экзотермический процесс протекает до расплавления электродного стержня. При недостаточном их количестве для образования экзотермической смеси в электродном покрытии экзотермический процесс будет протекать на стадии формирования и переноса капли.

В научной статье [18] приведены данные механических свойств, химического и газового состава металла швов и неметаллических включений, выполненных различными партиями разработанных электродов с экзотермической смесью в покрытии, которые показывают, что электроды по механическим свойствам и содержанию в наплавленном металле серы и фосфора полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ 9467-75 к электродам типов Э46(ЭТ-3), Э50А (ЭТ-2) и Э60 (ЭТ-4).

Исследование сварочно-технологических свойств разработанных электродов показало следующее: дуга легко возбуждается и стабильно горит; покрытие плавится равномерно, разбрызгивание малое (рис. 1, а); формирование валика – мелкочешуйчатое (рис. 1, б); отделимость шлаковой корки – лёгкая; коэффициент наплавки – 11,8–12,5 г/А·ч; скорость плавления – 21,5–25 м/ч.

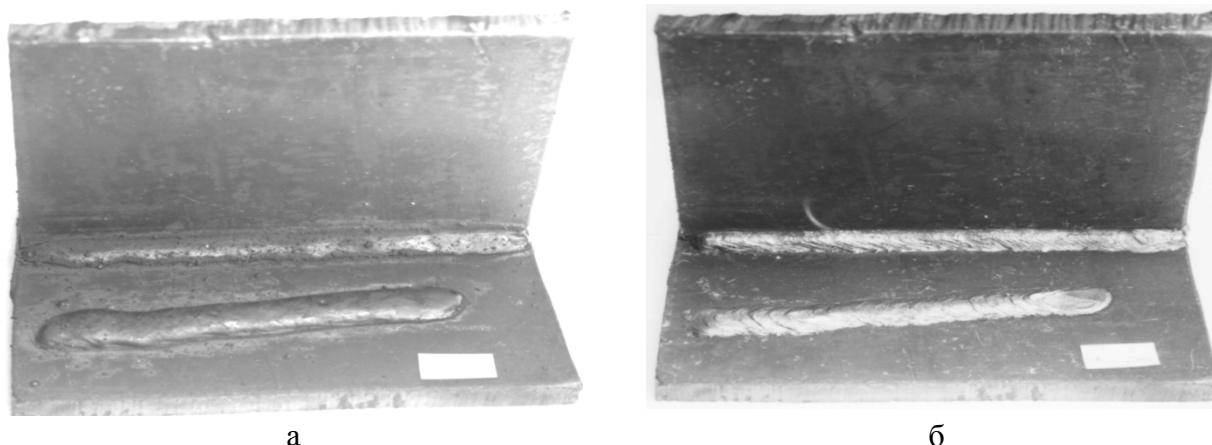


Рис. 1. Внешний вид наплавленного валика, углового шва и мелкочешуйчатое формирование наплавленного валика, выполненных исследуемыми электродами типа ЭТ–2 ( $d_3 = 5,0$  мм) с экзотермической смесью в покрытии:

а – наплавленный валик, угловой шов; б – мелкочешуйчатое формирование наплавленного валика

В работе [19] высокая производительность термитнодуговой наплавки под экзотермическим флюсом достигнута, прежде всего, наличием в нем термитной (экзотермической) смеси и металлических порошковых присадок. Шлаковая система флюса представляет собой совокупность соединений  $Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-CaF_2$ . Состав экзотермического флюса содержит (с учетом связующего): 40 % железоалюминиевой термитной смеси и 18 % железного порошка. Опытная наплавка на пластины из стали Ст3 производилась на следующем режиме:  $I_{св} = 500$  А,  $U_d = 41-43$  В,  $V_n = 25$  м/ч,  $V_{эл} = 148$  м/ч.

Производительность расплавления присадочного металла при наплавке под экзотермическим флюсом рассчитывалась по формуле:

$$g_{P(т-д)} = g_P (1 + K_{\phi} \cdot P_{м.п} + K_{\phi} \cdot P_{э.с} \cdot K_{в.м}), \quad (1)$$

где  $K_{\phi}$  – относительная масса расплавленного флюса;  $g_P$  – производительность расплавления электродной проволоки, г/с;  $K_{в.м}$  – коэффициент выхода восстановленного металла из термитной смеси, входящей в состав флюса;  $P_{м.п}$  – доля металлических присадок в составе флюса;  $P_{э.с}$  – доля термитной (экзотермической) смеси в составе флюса.

Так как производительность наплавки под экзотермическим флюсом  $g_{н(т-д)}$  определяется производительностью расплавления присадочного металла  $g_{P(т-д)}$  с учетом коэффициента потерь  $\phi$ , отражающего суммарную потерю электродного металла, металлических порошковых присадок и восстановленного металла, то

$$g_{н(т-д)} = g_{P(т-д)} (1 - \phi) = g_P (1 + K_{\phi \cdot P_{м.п}} + K_{\phi \cdot P_{э.с}} \cdot K_{в.м}) (1 - \phi). \quad (2)$$

С повышением концентрации термитной смеси в составе флюса относительные массы расплавленного флюса  $K_{\phi}$  и образующегося шлака  $K_{ш}$ , а также производительность наплавки увеличиваются (рис. 2). При этом, имеется значительная разница между значениями  $K_{\phi}$  и  $K_{ш}$  (в связи с переходом из флюса в сварочную ванну восстановленного из окалины железа).

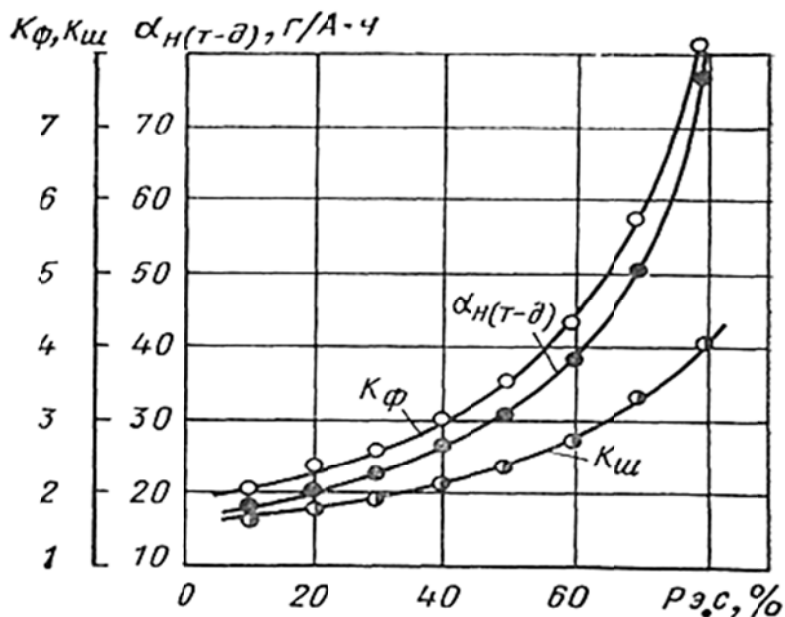


Рис.2. Залежність відносної маси розплавленого флюсу  $K_f$ , відносної маси шлаку  $K_{ш}$  та коефіцієнта наплавки  $\alpha_{н(\tau-\theta)}$  від концентрації термитної суміші в складі екзотермічного флюсу  $P_{э.с.}$ .

Таким образом, продуктивність термитно-дугового зварочного процесу під екзотермічним флюсом (по порівнянню з звичайним процесом під флюсом АН-348А) збільшується в 1,5–3,5 рази.

Результати досліджень [20, 21] процесів плавлення порошкових проволочок показали, що температура на їх торці недостатня для повного розплавлення сердечника, забезпечуючого перехід електродного металу через стадію краплі.

При плавленні порошкових електродних матеріалів спостерігається відставання швидкості плавлення сердечника від швидкості плавлення оболочкі, що призводить до самопроизвольного поступлення компонентів сердечника в зварочну ванну, причому цей перехід не регулюється.

Порошкові ленти широко застосовують при наплавці зносостійких сплавів. Однак їх технологічні можливості (в ряду випадків) обмежені явищем різних швидкостей плавлення оболочкі та наповнювача, що призводить до зниження якості наплавленого металу. Такому процесу переходу компонентів при плавленні порошкових лент сприяє тугоплавкість шихтових компонентів, недостатня ступінь спільного обжарювання оболочкі та сердечника та дефіцит ефективного тепла для плавлення.

Застосування екзотермічних сумішей на основі гематиту та ферросплавів дозволяє звести до мінімуму передачу теплової енергії від оболочкі до наповнювача та підвищити показники плавлення порошкових лент.

Тепловий ефект ексореакцій можна регулювати за рахунок вмісту екзотермічної складової в наповнювачі, а установив оптимальний склад та вміст цієї складової в наповнювачі, – регулювати швидкість плавлення оболочкі та наповнювача, забезпечивши їх рівномірність.

Отримані експериментальні дані показують: при введенні в склад наповнювача порошкових лент екзотермічних сумішей на основі оксидів заліза забезпечується протікання реакції на торці електрода, що дозволяє уникнути просипання частинок наповнювача, що призводить до підвищення якості наплавленого металу; залізна окалина (гематит) в наповнювачі порошкових лент знижує шунтування струму наповнювачем та підвищує

скорость нагрева оболочки лент, что способствует плавлению электрода; экзотермические смеси в наполнителе различного состава практически не меняют характер нагрева оболочки и наполнителя порошковых лент, но изменяют температуру нагрева и его скорость.

При электрошлаковых процессах ряд вышеперечисленных недостатков может быть устранен путем применения экзотермических смесей (флюсов) соответствующего состава и предложенного нового способа расплавления рабочего флюса [22], позволяющего повысить выход годного металла до 3 %, снизить расход электроэнергии и рабочего флюса соответственно на 10 и 20 %.

Равномерность химического состава наплавленного металла и уменьшение глубины проплавления основного металла обеспечивается тем, что на поверхность изделия устанавливается формирующее устройство (связанные между собой пластины по периметру на ширину валика) и в его пространство насыпается слой электропроводной экзотермической легированной металлофлюсовой смеси (например, на кромки инструмента холодного или горячего деформирования).

Масса слоя, содержащего в экзотермической металлофлюсовой смеси легирующие элементы (Mo, Cr, V, Si, Mn и др.), берется в количестве, которое обеспечило бы получение заданного объема качественного наплавленного металла за один проход [20]. При необходимости наплавки широких плоских поверхностей процесс повторяется после наложения предыдущего валика.

Благодаря наличию в данной смеси восстановителя (Al, Ti, Si, SiCa, Zr) и окислителя (окалины, гематита и других компонентов, содержащих кислород) в заданном количестве достигается ускорение расплавления самой смеси и флюса за счет тепла, выделяемого вследствие экзотермической реакции, и снижения электропроводности шлаков.

В работе [3] указывается, что существенное увеличение производительности расплавления порошковой ленты достигается при введении в состав шихты термитной смеси, содержащей ферробор и ферротитан (ПЛ-2 и ПЛ-3), что объясняется изменением условий тепло- и электрообмена оболочки с шихтой, зависящего от природы используемого в шихте восстановителя.

В отличие от железного и алюминиевого порошков ферробор и ферротитан значительно снижают тепло- и электропередачу от оболочки в шихту, что способствует увеличению  $\alpha_p$  и  $\alpha_{p.пл.}$ . Использование ферробора и ферротитана в термитной смеси позволяет увеличивать количество железа в металле шва. Кроме того, во время экзотермической реакции железо восстанавливается из гематита, что в сочетании с железом, переходящим из ферросплавов, обеспечивает увеличение  $\alpha_n$ .

При наличии термитной смеси в шихте, несмотря на относительно высокую скорость расплавления оболочки и порошковой ленты, в целом обеспечивается равномерное плавление сердечника и оболочки. Испытания показали, что тепловой эффект экзотермической реакции вполне достаточен для дополнительного нагрева сердечника и равномерного плавления порошковой ленты, в результате чего снижается вероятность перехода нерасплавленного сердечника в сварочную ванну.

Плавление порошковых лент сопровождается мелкокапельным переносом. Производительность их расплавления увеличивается на 40–60 %, а наплавки – на 30 %. Кроме того, достигается экономия электроэнергии (1500 кВт·ч на 1 т наплавленного металла).

Расчетно-экспериментальным путем был оценен тепловой баланс плавления порошковой ленты с термитной шихтой при  $I_d = 1000$  А и  $U_d = 32$  В. Полная мощность дуги составляет 32 кДж/с. В результате экзотермической реакции выделяется дополнительная тепловая мощность. По расчетным данным она составляет 10 % от полной мощности дуги. Тепловая мощность дуги распределяется на плавление оболочки (до 25 %), а также в виде теплоты излучения – около 20 % (6400 Дж/с). Можно полагать, что с учетом теплоты экзотермической реакции ее расход на нагрев и плавление сердечника приближается к величине 10 кДж/с, что обеспечивает равномерное плавление сердечника и оболочки.

Эффективно применение экзотермических смесей при термообработке в процессе наплавки высоколегированных хромистых сталей [21].

Оптимальным сочетанием износостойкости и эксплуатационной надежности обладают наплавочные износостойкие материалы со структурой нестабильного остаточного аустенита, упрочняющегося в процессе изнашивания абразивными частицами.

Значительное влияние на повышение износостойкости кромок штампов оказывает упрочняющая фаза. Однако ее содержание в структуре сплава для прессующих штампов по соображениям эксплуатационной надежности не должно превышать 13 %.

Матрица наплавки стали X12Ф1 (близкая по структуре к оптимальной) образуется при охлаждении образцов со скоростью 10–14 град/с.

Расчеты тепловой мощности, необходимой для обеспечения такой скорости охлаждения, показали, что при наплавке на заготовку из стали 30 толщиной 25–40 мм потребуется вводить до 71 кДж/см длины шва, в то время как погонная энергия наплавки проволокой ППХ12Ф1-0 диаметром 3,5 мм не превышает 21 кДж/см.

Обеспечить эффективное проведение термообработки в процессе наплавки значительного количества теплоты (до 50 Дж/см), по сравнению с другими технологическими приемами, можно только с применением экзотермических смесей.

Важными факторами являются: автономность применения, возможность регулирования теплового эффекта, температуры реакции и скорости ее протекания (за счет соответствующего подбора химических соединений и удельного расхода смеси).

При наплавке порошковой проволокой ПП-Х12Ф1-0 изотермическую выдержку (подогрев) целесообразно производить в момент начала аустенитно-карбидного превращения, то есть при температуре 950–1000 °С. Следовательно, температура воспламенения флюса должна находиться в этом интервале температур. Кроме того, при окислительно-восстановительной реакции должно выделяться количество теплоты, достаточное для замедления скорости охлаждения наплавки в области аустенитно-карбидных превращений (А→К) от 50 град/с до 10–14 град/с, то есть не менее 60 кДж/см.

Количество теплоты, вводимой в металлы, можно регулировать путем изменения удельного расхода смеси на поверхности валика наплавленного металла.

При скорости наплавки  $V_{св}$ , равной 0,4 см/с, будет выделяться 12916 Дж/см, при  $V_{св} = 0,6$  см/с тепловыделение флюса составит 8569 Дж/см, а при  $V_{св} = 0,8$  см/с флюс обеспечит 6437 Дж на сантиметр длины шва. Оптимальное соотношение аустенита, мартенсита и карбидов в основе (А/М/К= 73/19/8) образуется при расходе экзотермического флюса в количестве 11 г/см.

Таким образом, экзотермический флюс должен удовлетворять следующим требованиям: погонная энергия процесса наплавки с учетом экзотермической реакции должна составлять не менее 70 кДж/см; температура воспламенения – 920–1000 °С; скорость экзотермической реакции должна соответствовать скорости наплавки; шлак должен обладать хорошей отделяемостью, а смесь, в целом, должна быть безопасной в работе. Поставленным условиям соответствует состав экзотермического флюса  $KNO_3 + Al + CaSi_2$ .

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что эффективным способом повышения производительности дуговых и электрошлаковых процессов является использование экзотермической смеси или экзотермического флюса (окалина, ферросплавов и алюминиевого порошка, легирующих элементов) в количествах, достаточных для протекания экзотермических реакций.

2. Доказано, что наличие электропроводного слоя экзотермического флюса позволяет вести электрошлаковый процесс по бифазной или трехфазной схеме с использованием твердого старта.

3. Установлено, что порошковые ленты, содержащие экзотермические смеси на основе гематита и ферросплавов, позволяют свести к минимуму передачу тепловой энергии от оболочки к наполнителю и повысить показатели их плавления.

4. Промышленные испытания показали, что применение экзотермических смесей в электрошлаковых процессах, позволяет использовать высвобождающиеся флюсоплавильные печи под электрошлаковые процессы при изготовлении крупногабаритных деталей ответственного назначения.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // – Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 23–25.
2. Иоффе И. С. Влияние титанотермитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки / И. С. Иоффе [и др.] // Сварочное производство. – 1980. – № 3. – С. 26–28.
3. Зареченский А. В. Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями / А. В. Зареченский [и др.] // Сварочное производство. – 1985. – № 8. – С. 39–41.
4. Ворновицкий И. Н. Новые электроды с фтористокальциевым покрытием 'ТМУ-21' / И. Н. Ворновицкий [и др.] // Сварочное производство. – 1975. – № 1. – С. 33–35.
5. Саенко В. Е. Электроды типа Э50А с магнетитом в покрытии / В. Е. Саенко [и др.] // Сварочное производство. – 1976. – № 6. – С. 46–47.
6. Ворновицкий И. Н. Высокопроизводительные электроды для дуговой сварки / И. Н. Ворновицкий, И. М. Вагапов. – М. : Машигиз, 1963. – 104 с.
7. Походня И. К. Высокопроизводительные низкотоксичные электроды АНО-1 / И. К. Походня, А. М. Бейниш, А. Е. Марченко // Автоматическая сварка. – 1962. – № 3. – С. 19–26.
8. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки : Учебник для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. / А. И. Акулов [и др.], под ред. А. И. Акулова. – М. : Машиностроение, 2003. – 560 с. : ил. ISBN 5-217-03130-1.
9. Юзвенко Ю. А. Наплавка. / Ю. А. Юзвенко. – Киев : Наукова думка, 1976. – 78 с.
10. Хренов К. К. Керамические флюсы для автоматической дуговой сварки / К. К. Хренов, Д. М. Кушнарев. – Гостехиздат. УССР, 1954.
11. Кузнецов В. Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів / В. Д. Кузнецов, В. М. Пащенко // Навч. посібник. – К. : НМЦВО, 1999. – 175 с.
12. Фруммин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка / И. И. Фруммин. – Харьков : Металлургиздат, 1961. – 421 с.
13. Электрошлаковые печи. Под ред. Патона Б. Е. и Медовара Б. И. – Киев : Наукова думка, 1976. – 414 с.
14. Тягун-Белоус Г. С. Электропроводный флюс в твердом состоянии для возбуждения электрошлакового процесса / Г. С. Тягун-Белоус // Автоматическая сварка, 1958. – № 4. – С. 65–66.
15. Дидковский В. П. Твердый флюс для возбуждения процесса электрошлаковой сварки титана / В. П. Дидковский // Автоматическая сварка. – 1958. – № 4. – С. 95–96.
16. Максимович Б. И. Наведение шлаковой ванны с помощью самоплавящегося флюса / Б. И. Максимович // Автоматическая сварка. – 1959. – № 10. – С. 90–91.
17. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов. / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, А. И. Леценко. – Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 2 (4). – С. 65–68.
18. Власов А. Ф. Исследование и разработка электродов с экзотермической смесью в покрытии для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей: диссертация канд. техн. наук : 05.04.05 : защищена 21.05.84 : утв. 10.10.84 / Власов Анатолий Федорович. – Киев, 1984. – 235 с. – 04200201565.
19. Глуценко А. С. Повышение производительности расплавления металла при термитной сварке под флюсом / А. С. Глуценко, Л. К. Лецинский // Автоматическая сварка, 1976. – № 10. – С. 68.
20. Деклараційний патент 71290А Україна, МКІ В23К 9/04. Спосіб электродугово наплавлення / Власов А. Ф., Карпенко В. М., Жаріков С. В., Нерівний А. В. Заявлено 18.12.03. № 20031211810; опубл. 15.11.04. Бюл. № 11.
21. Попов В. С. Термическая обработка металла экзотермическим флюсом в процессе автоматической наплавки / В. С. Попов [и др.] // Автоматическая сварка, 1976. – № 12. – С. 46–49.
22. Деклараційний патент 36618А, Україна, МКІ В23К 25/00. Спосіб електрошлакового зварювання / Карпенко В. М., Власов А. Ф.; Заявлено 13.01.00 № 200001024; опубл. 16.01.01, Бюл № 3.