Абашкин Е. Е., Жилин С. Г., Комаров О. Н.

E. E. Abashkin, S. G. Zhilin, O. N. Komarov

**ВЛИЯНИЕ УПАКОВКИ КОМПОНЕНТОВ ТЕРМИТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ
Порошковой проволоки на процессы электродугового переплава**

**PACKING INFLUENCE OF THERMITE FILLER COMPONENTS OF THE FLUX CORED
WIRE ON ELECTRIC ARC REMELTING PROCESSES**

Абашкин Евгений Евгеньевич – младший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: abashkine@mail.ru.

Mr. Evgeny E. Abashkin – Junior Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: abashkine@mail.ru.

Жилин Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Mr. Sergey G. Zhilin – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru.

Комаров Олег Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Mr. Oleg N. Komarov – PhD in Engineering, Leading Researcher, Institute of Machinery and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru.

Аннотация. В ряду технологических задач, связанных с изготовлением стальных конструкций, наиболее значимой представляется задача получения качественных неразъемных соединений с высокой эксплуатационной прочностью, которая достигается в результате применения сварочного процесса. При таком процессе соединение возникает после появления локальной зоны оплавления и последующего охлаждения на стыке соединяемых материалов. К недостаткам такого способа следует отнести: значительную трудоёмкость процесса, высокую стоимость сварочных материалов и расходов на электроэнергию. Устранить отмеченные недостатки возможно применением новых материалов, среди которых порошок на основе термитной композиции, состоящей из смеси отходов металлургического комплекса: оксида железа и алюминия. Такая смесь перспективна для получения проволоки с термитным порошковым наполнителем, применяемой при автоматической сварке под слоем флюса. Использование указанного процесса отличается понижением энергозатрат при одновременном увеличении качества получаемого неразъемного соединения. Исследование возможности повышения эффективности порошкового наполнителя на основе термитных смесей представляется актуальным. В работе ставится задача изучения влияния параметров упаковки порошкового термитного материала проволоки на объем получаемого металла в локальной зоне оплавления, определяющего возможность регулирования прочностных и геометрических характеристик соединения.

Summary. Among the technological tasks connected with production of steel structures, receiving of high-quality one-piece connections with high operational strength which is reached as a result of application of welding process is represented as the most significant. Connection occurs after emergence of a local burn-off zone and the subsequent cooling on a joint of the connected materials. The drawbacks of this method are the following: considerable labor input of process, high cost of welding materials and the cost of electricity. There are many methods to eliminate noted drawbacks: using new materials such as a powder based on the thermite mixture, consisting of metallurgical complex waste mixture: iron oxide and aluminum. Such mixture is perspective for receiving the wire with thermite powder filler used for automatic welding under a flux layer. The use of this process is characterized by a reduction in energy consumption, while increasing the quality of the received one-piece connection. The research of the possibility of increasing the efficiency of powder filler based on the thermite mixtures is relevant. The task of

the work is to study the packing influence of flux cored wire material parameters on the volume of the received metal in a local burn-off zone, which determines the possibility of regulation strength and geometric characteristics of the joint.

Ключевые слова: термитная смесь, химический состав, фракция, выход металлической фазы, экзотермическая реакция, железоуглеродистые сплавы, электродуговой переплав, электрод, сердечник, порошковая проволока.

Key words: thermite mixture, chemical composition, fraction, metal phase output, exothermic reaction, iron-carbon alloys, electric arc remelting, electrode, core, flux-cored wire.

УДК 624.791

Введение

Получение качественных неразъемных соединений с высокой эксплуатационной прочностью представляется наиболее значимым в ряду современных технологических задач. Достижение высоких прочностных характеристик соединяемых элементов протяженных конструкций возможно в процессе локального оплавления и последующего охлаждения их стыковой зоны в результате применения сварочного процесса. Быстрое и качественное получение сварного соединения зависит от квалификации исполнителя работ и обеспечивается использованием высокопроизводительного оборудования, применяемыми сварочными материалами. Среди сварочных материалов сегодня находят широкое применение покрытые электроды для ручной дуговой сварки, проволока сплошного сечения и различные порошковые проволоки [1].

Получение сварного соединения с использованием порошковых проволок позволяет устранить ряд недостатков, характерных для других сварочных материалов и способных заметно снизить производительность: низкую степень защиты сварочной ванны от взаимодействия с внешней средой, значительные потери на угар и разбрызгивание, необходимость подготовительных операций, например, в виде сушки при использовании электродов; высокую вероятность неоднородности химического состава и неравномерности распределения легирующих элементов и примесей по сечению сплошной проволоки.

Порошковые проволоки представляют собой непрерывный электрод, как правило, в виде трубки, сердечник которой заполнен порошковой композицией, состоящей из минералов, химикатов, ферросплавов и т.д. [2]. Химический и гранулометрический составы материала сердечника зависят от назначения и требуемых свойств неразъемного соединения и призваны обеспечить высокое качество формирующегося шва при снижении стоимости и трудоемкости процесса [3].

Ввиду отмеченного выше для сердечника проволоки, применяемой для соединения элементов из низкоуглеродистых или низколегированных сталей при автоматической сварке под слоем флюса, наиболее предпочтительным представляется использование порошка на основе термитной композиции, имеющей в своем составе смесь отходов металлургического комплекса: оксида железа, восстановителя и добавок. Такой химический состав сердечника обусловлен необходимостью сокращения энергозатрат за счет тепловыделения в результате взаимодействия железной окалины с материалом восстановителя в ходе экзотермической реакции. Оксиды железа восстанавливаются до железа с ферритной структурой. Шлак, образующийся в результате реакции, более чем на 70 % состоит из Al_2O_3 , обладает большой теплоемкостью и защищает сварочный шов и околошовную зону от быстрого охлаждения. В рассматриваемом процессе окалину можно представить в виде Fe_nO_m , поскольку она может содержать оксиды железа с разной окисленностью: FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Ввиду того, что одним из продуктов окислительно-восстановительного процесса является Al_2O_3 , такую реакцию можно представить следующим выражением [4]:

В настоящее время применяется несколько вариантов шихт для порошковой проволоки, в составе которых в качестве восстановителя используют алюминиево-магниевый [5] либо алюми-

ниевый [6] порошки в соотношениях, позволяющих повысить коэффициент расплавления трубчатого электрода. При составлении термитной шихты применяют наполнители, в качестве которых в данном случае выступает материал самой проволоки, для изготовления которой применяется неполированная, особо мягкая лента из низкоуглеродистой стали холодной прокатки, выполненная согласно требованиям ГОСТ 503-81. Ширина и толщина ленты определяются требуемым диаметром электрода и технологией его изготовления.

В качестве легирующих и раскисляющих компонентов в порошках таких проволок применяют различные добавки, среди которых ферромарганец и ферросилиций. Присутствие последних направлено на обеспечение требований соответствия марке и виду получаемого сплава, прочностных характеристик соединения в зоне стыка. Содержание добавок и ферросплавов в термитной шихте определяют по формуле [7]

$$m_{\phi} = [m_{\tau}(\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\tau\phi}) + m_{\text{н}}(\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{н}\phi})] / (\mathcal{E}_{\phi\phi} - \mathcal{E}),$$

где m_{ϕ} – масса ферросплава, кг; m_{τ} – масса термита, кг; ϕ – выход термитной стали; $m_{\text{н}}$ – масса наполнителя, кг; $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}_{\tau\phi}$, $\mathcal{E}_{\phi}$ и $\mathcal{E}_{\text{н}}$ – среднее содержание химического элемента соответственно в металле, исходной термитной стали, ферросплаве и наполнителе, %.

Однако идентичность структуры и свойств соединяемых металлических элементов и зоны термического влияния, как правило, не достигается, что приводит к искажению геометрических характеристик конструкции и определяет актуальность изучения тепловых процессов, происходящих в сварочной ванне, а также методов их регулирования, в том числе посредством изменения параметров порошкового материала в проволочном электроде: химического и фракционного состава компонентов, плотности упаковки наполнителя и равномерности распределения компонентов в объеме смеси.

Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния технологических параметров подготовки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на объем получаемого металла в локальной зоне оплавления, определяющего возможность регулирования прочностных и геометрических характеристик неразъемного соединения.

В рамках указанной цели в работе решались следующие задачи:

- определение оптимального химического и фракционного составов компонентов исходной порошковой термитной смеси;
- исследование зависимости насыпной плотности, интенсивности горения и выхода восстановленного металла от времени механической обработки компонентов термитной смеси.

Порошковые компоненты термитных шихт, как правило, представляют собой полидисперсные системы, состоящие из частиц различной крупности. Существенное расхождение параметров гранулометрического состава шихтовых компонентов, вызванное различием физико-механических характеристик применяемых материалов, определяет неравномерность распределения компонентов в порошковом теле сердечника по завершению его упаковки в электрод. Значительно снизить сепарацию компонентов по плотности возможно выравниванием гранулометрических показателей смеси: фракции и формы компонентов.

Экспериментально определено, что наиболее предпочтительным для обеспечения массового выхода восстановленного в ходе экзотермической реакции металла является диапазон значений 20...30 % содержания восстановителя на основе алюминиевых сплавов в порошковой термитной смеси [8, 9]. Использование порошковой шихты с содержанием в ней восстановителя меньшим, чем указано в этом диапазоне, приводит к сокращению массового выхода получаемого металла до 1,5 раз; использование восстановителя в количестве более 30 % на изменение выхода термитного металла влияет незначительно, но приводит к высокому содержанию остаточного алюминия в конечном продукте.

Достижение требуемых показателей восстановления и теплогенерации термитного наполнителя порошковой проволоки обеспечивается использованием химически чистых составляющих термитной смеси. Однако выбор химического и фракционного составов сердечника в производственных условиях регламентируются в большей степени практическими соображениями, опреде-

ляемыми сечением электрода, фактическим наличием, способом получения и подготовки материалов. Это обстоятельство в известной степени усложняет расчет состава термитной шихты.

Термитная шихта представляет собой многокомпонентную порошковую смесь, неравномерное послойное распределение которой в сердечнике может оказать значительное влияние на качество сварных соединений. Компоненты, не вступившие в реакцию, после ее завершения могут перейти в шлак, изменить химический состав ванны, сократить массу восстановленного металла, дестабилизировать процесс горения дуги и, как следствие, оказать влияние на формирование геометрии и прочностных свойств сварного шва.

Для приготовления исходной термитной шихты использовали порошки, внешний вид которых представлен на рис. 1, содержащие железную окалину (Fe_2O_3), алюминий (Al), ферромарганец ФМн78(А) (ГОСТ 4755-91), ферросилиций ФС50 (ГОСТ 1415-93), порошок графитированных электродов ЭГ15 (ТУ 14-139-177-2003) фракций 0,16...0,315 мм, полученных рассевом на ситах модели 026 (ГОСТ 29234.3-91). Наличие графита в составе термитной шихты в количестве 0,1...4 % по массе позволяет обеспечить соответствие его содержания в ванне расплава низкоуглеродистым и низколегированным маркам сталей. Таким образом, обеспечивается требуемое содержание углерода в структуре получаемого соединения.

Указанный фракционный состав компонентов смеси представляется наиболее технологически предпочтительным, т.к. позволяет получить удовлетворительное качество упаковки продукта и обеспечивает стабильность его горения.

Рис. 1. Форма и сравнительные размеры частиц исходных компонентов термитных смесей:
а – порошок железной окалины, фракция 0,2...1,5 мм; б – стружка алюминиевого сплава, фракция 0,2...1,5 мм; в – порошок ферромарганца ФМн78(А) по ГОСТ 4755-91, фракция 0...0,4 мм;
г – порошок ферросилиция ФС50 (ГОСТ 1415-93); д – порошок графитированных электродов ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003, фракция 0...0,063 мм; е – внешний вид среза порошковой проволоки с термитным наполнителем

На рис. 1 видно, что формы частиц различных компонентов не идентичны, что определяется технологическими особенностями их получения. Так, например, ферросплавы получены дроблением кусковых материалов и после сепарации представляют собой частицы со значительным количеством сколов и острых граней. Частицы окалины, как правило, плоские, с характерными заостренными краями. Фракция материала восстановителя получена распылением жидкого алю-

миниевого сплава с последующим рассевом. Форма восстановителя преимущественно представлена хлопьевидными вытянутыми частицами со скругленными краями.

Характеристикой качества упаковки является коэффициент заполнения (K_3) сердечника порошковой проволоки. На рис. 1, *е* слева представлен внешний вид среза порошковой проволоки со значением коэффициента заполнения сердечника $K_3 \leq 0,15$, справа – проволока с коэффициентом заполнения $0,15 < K_3 \leq 0,4$, при котором обеспечивается максимальный массовый выход восстановленного металла и технологически приемлемая воспламеняемость смеси. K_3 порошковой проволоки с термитной шихтой определяется выражением [10]

$$K_3 = M_{\text{тш}} / (M_3 + M_{\text{тш}}),$$

где $M_{\text{тш}}$ – масса термитной шихты; M_3 – масса электрода.

Параметр K_3 связан с плотностью упаковки сердечника, для определения влияния которой на физико-химические процессы, протекающие в ходе экзотермической реакции, была проведена серия экспериментов.

Получение порошковой проволоки с максимально возможным значением параметра K_3 , а также достижение полноты прохождения реакции и, следовательно, максимального выхода восстановленного металла возможны при использовании равного фракционного и гранулометрического составов компонентов термитной шихты. Диапазон исходных размеров частиц компонентов, используемых при составлении шихт для сердечника проволоки с $\varnothing = 2,8$ мм, фактически составляет 0,1...0,4 мм. Значительное расхождение значений плотности компонентов термитной шихты и различие в размерах не позволяют получить упаковку сердечника с равномерным распределением элементов по его сечению, что оказывает влияние на структуру и свойства сварного соединения.

С целью минимизации расхождения размеров фракций компонентов и увеличения насыпной плотности термитная шихта подвергалась обработке в шаровой мельнице типа МШ-20 в течение 60 мин. Визуализация результата такого совместного дробления компонентов термитной смеси получена при помощи электронного растрового сканирующего микроскопа ZEISS EVO LS10 и представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что линейные размеры частиц окислы уменьшаются после дробления до 2 раз, а частицы восстановителя приобретают более глобулярную форму, обеспечивая увеличение площади контакта компонентов термитной шихты. Последнее определяет увеличение насыпной плотности термитной шихты, что в свою очередь приводит к более полному прохождению экзотермической реакции и, следовательно, оказывает влияние на выход восстановленного металла.

Рис. 2. Фракционный состав компонентов термитной шихты:
а – до обработки в шаровой мельнице; б – после обработки

Таким образом, технологически важным является определение времени механической обработки термитной шихты, при котором достигается максимальное значение ее насыпной плотности. На рис. 3 представлена зависимость изменения насыпной плотности термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице.

Рис. 3. Зависимость изменения насыпной плотности термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице

Из рис. 3 следует, что по истечении 30...40 мин. значение насыпной плотности термитной смеси составляет 2,5 г/см³ и дальнейшая ее обработка не представляется целесообразной ввиду незначительного увеличения исследуемого параметра.

Для корректного составления термитной шихты с целью практической реализации технологии применения порошковой проволоки с термитным наполнителем необходим учет интенсивности горения и массового выхода восстановленного металла.

В ходе эксперимента интенсивность горения шихты определяли временем, фиксация которого осуществлялась с момента начала экзотермической реакции до ее завершения в навеске смесей массой 0,1 кг с различной насыпной плотностью. На рис. 4 представлена зависимость отмеченного выше показателя от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице.

Совместный анализ данных, представленных на рис. 3 и 4, показал, что максимальное значение насыпной плотности до 2,5 г/см³ достигается в интервале времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице 30...40 мин., что соответствует максимальной интенсивности горения термитной шихты, значение которой в этом диапазоне времени достигает 21 г/с. При дальнейшей обработке в шаровой мельнице термитной шихты интенсивность ее горения не увеличивается.

Важным технологическим параметром сварочного процесса является масса наплавленного металла, что обуславливает необходимость определения массового выхода восстановленного металла при изменении насыпной плотности термитной шихты, задействованной в экзотермической реакции. Изменение массового выхода металла определяли следующим образом: в равных объемах термитной шихты с различными значениями насыпной плотности, полученными при разном времени обработки шихты в шаровой мельнице, инициировали экзотермическую реакцию и регистрировали массу металла, образовавшегося по завершении процесса расплавления. Размерность значений массового выхода представлена в процентах. На рис. 5 представлена зависимость массового выхода восстановленного металла от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице.

Рис. 4. Зависимость интенсивности горения термитной шихты от времени ее обработки в шаровой мельнице

Из рис. 5 видно, что максимальное значение массового выхода металла (до 50 %) наблюдается при осуществлении экзотермического процесса в термитных смесях, обработанных в мельнице в течение 30...40 мин., а значит, согласно данным, представленным на рис. 3, достигших значения насыпной плотности перед началом реакции 2,5 г/см³. Некоторое снижение массового выхода металла после 40 мин. обработки в шаровой мельнице объясняется, по-видимому, «повторной сепарацией» компонентов, обусловленной снижением размеров частиц окалины при неизменности размеров частиц восстановителя. Поскольку при свободной засыпке термитной шихты существенно увеличить ее насыпную плотность не удастся, то продолжение предварительной обработки шихты не представляется целесообразным.

Рис. 5. Зависимость массового выхода восстановленного металла от времени обработки термитной шихты в шаровой мельнице

Таким образом, технологически обоснованным представляется применение процесса предварительной подготовки материалов наполнителя порошковой проволоки перед их упаковкой в сердечник, заключающийся в обработке термитной шихты в течение 30...40 мин. в шаровой мельнице. Такая предварительная обработка позволяет повысить однородность фракционного и гранулометрического составов термитной шихты, что определяет увеличение интенсивности ее горения и достижение значения выхода металла 50 % от массы веществ, вступающих в реакцию.

Последующее применение термитной шихты связано с изменением параметров порошкового тела, а именно его уплотнением. Прошедшие предварительную подготовку компоненты смеси дозируются в формирующее устройство, где происходит заполнение термитной шихтой трубчатой металлической оболочки проволоки. Полученная заготовка обжимается на волочильной машине до требуемого диаметра и уже в виде проволоки наматывается на кассеты.

Во время упаковки в проволочный электрод плотность термитной шихты увеличивается в 1,2...1,6 раз. Увеличение плотности упаковки термитной шихты направлено на решение таких задач, как сокращение размеров технологической оснастки и повышение массового выхода восстановленного из термитной шихты металла. Это обстоятельство определяет необходимость учета массового выхода восстановленного в ходе экзотермической реакции металла при формировании ванны расплава в зоне стыка соединяемых деталей.

Для получения экспериментальных зависимостей массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей последние (как предварительно обработанные в шаровой мельнице, так и не подвергавшиеся такой обработке) посредством одностороннего прессования уплотняли в замкнутом объеме цилиндрической формы до значений плотности, превышающих первоначальные значения в 1,2...1,6 раз. Масса навески термитной шихты в каждом опыте составляла 0,1 кг. Форма уплотненных навесок термитной шихты различной плотности соответствовала диапазону отношения диаметра основания (D) к высоте прессовки (H): $H = (1...1,4)D$. Такие размерные параметры обеспечивают минимальное расхождение значений плотности прессовки по ее высоте. На рис. 6 представлены зависимости массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей уплотненных.

Из анализа рис. 6 видно, что наибольший выход металла (до 53 % от массы шихты) достигается при плотности упаковки смеси 3,25 г/см³. Использование уплотненного наполнителя сердечника из предварительно обработанной в шаровой мельнице термитной шихты позволяет увеличить выход металла на 6 % в сравнении с использованием неуплотненной термитной смеси и на 8...10 % – с применением неподготовленной уплотненной термитной шихты.

Рис. 6. Зависимости массового выхода восстановленного металла от плотности упаковки термитных смесей уплотненных: 1 – без обработки в шаровой мельнице; 2 – после обработки в шаровой мельнице

Результаты проведенных исследований использованы при изготовлении образца порошковой проволоки с наполнителем из термитной шихты, предварительно обработанной в шаровой мельнице.

Таким образом, подготовка термитной смеси технологически оправдана и позволяет увеличить массовый выход восстановленного металла, что оказывает влияние на увеличение протяженности и повышение качества сварного шва из термитного металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин, В. А. Исследование влияния конструктивных особенностей и химического состава наполнителя, порошковых проволок на режимы электродуговой сварки / В. А. Рыбин, В. А. Иванов // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 7(32). – С. 55-59.
2. Яковлев, Д. С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой / Д. С. Яковлев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 92-95.
3. Порошковые и композиционные проволоки для сварки и наплавки: учеб. пособие / Г. Н. Соколов, Ю. Н. Дубцов, И. В. Зорин, А. А. Артемьев. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 128 с.
4. Получение литья повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин, В. В. Предеин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 11. – С. 6-11.
5. А. с. СССР № 835682. Шихта порошковой проволоки / А. В. Зареченский, А. А. Колечко, Н. А. Шепель, А. С. Суржиков, М. П. Муратова; заявл. 15.06.1979; опубл. 07.06.1981. Бюл. № 21. – 2 с.
6. Пат. РФ № 2454309. Порошковая проволока // И. Г. Сапченко, Е. Е. Абашкин; заявл. 30.06.2010; опубл. 27.06.2012. Бюл. № 18.
7. Новохацкий, В. А. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибылями / В. А. Новохацкий, А. А. Жуков, Ю. И. Макарычев. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
8. Исследование влияния фракции компонентов алюмотермитной смеси на технологические параметры получения термитных сталей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, В. В. Предеин, Е. Е. Абашкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 6. – С. 33-37.
9. Использование алюминиевого сплава с высоким содержанием примесных элементов в качестве восстановителя для получения сортовых марок сталей при алюмотермии / В. В. Предеин, А. В. Попов, О. Н. Комаров, С. Г. Жилин, А. И. Евстигнеев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № III-1(31). – С. 106-114.
10. Рыбаков, В. М. Сварка и резка металлов / В. М. Рыбаков. – М.: Высш. шк., 1979. – 214 с.