

УДК 621.791.75

Власов А. Ф., Макаренко Н. А., Куший А. М., Куликов В. П.**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ИЗДЕЛИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Проблема повышения долговечности машин и оборудования является одной из актуальнейших народнохозяйственных задач. Срок службы быстроизнашивающихся деталей определяет рентабельность дорогостоящего оборудования. Интенсификация производственных процессов, увеличение рабочих давлений, скоростей и температуры приводят к ускорению изнашивания деталей и делают проблему повышения долговечности быстроизнашиваемых узлов машин еще более острой. Одним из важнейших направлений решения проблемы ресурсосбережения является разработка экономнолегированных сталей и наплавочных материалов, обеспечивающих повышенные механические и служебные свойства деталей машин и инструментов [1, 2]. Известно [3], что эффективность использования прессового и штампового оборудования для горячей обработки металлов ограничена недостаточной стойкостью рабочего инструмента и существенно зависит от температурного и силового нагружения в процессе эксплуатации (так как рабочий инструмент непосредственно соприкасается с нагретым металлом и испытывает значительные механические нагрузки (800...1000 МПа)). Дисперсионно-упрочняемые составы высоколегированного наплавленного металла позволяют эффективно достигать требуемых эксплуатационных характеристик наплаваемых изделий. Характерной особенностью наплавленного металла типа инструментальных штамповых сталей 25X5ФМС, 35В9Х3ФС, 30Х4В2М2ФС и других сталей является то, что в широком диапазоне скоростей охлаждения в нем исключается перлитное преобразование, и после наплавки образовывается мартенситная структура с небольшим количеством остаточного аустенита.

Для повышения производительности ручной дуговой наплавки возможно использование эффекта экзотермических реакций путём введения в состав используемых материалов в виде окислителей (окалины, гематита, марганцевой руды и др.) и раскислителей (ферротитана, ферросилиция, алюминиевого порошка и др.) [4, 5], при нагреве и плавлении которых протекает экзотермическая реакция до расплавления электродного стержня. При недостаточном количестве в покрытии электродов оксидов железа и элементов-раскислителей для образования экзотермической смеси экзотермический процесс протекает на стадии формирования и переноса капли.

Целью данной работы является исследование влияния количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов на производительность расплавления.

Значения стехиометрических коэффициентов взаимодействующих элементов определим на примере алюминия, беря отношение масс алюминия, восстановленного железа и оксида алюминия к массе закиси железа:



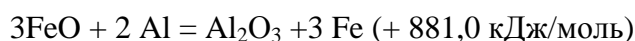
$$71,85 + 18 = 55,85 + 34; \quad (1)$$

$$Q_{\text{FeO}} + 0,25Q_{\text{FeO}} = 0,7773 Q_{\text{FeO}} + 0,4727 Q_{\text{FeO}},$$



где $0,25 Q_{\text{FeO}}$ – количество алюминия, необходимого для связывания доли оксида железа;
 $0,7773 Q_{\text{FeO}}$ – количество восстановленного железа из доли оксида железа;
 $0,4727 Q_{\text{FeO}}$ – количество оксида алюминия, образующегося при взаимодействии алюминия с долей оксида железа.

При введении в покрытие электродов экзотермической смеси выделяется дополнительное количество тепла за счет химической реакции между оксидами железа и элементами-раскислителями. Для реакции алюминия с оксидом железа



энтальпия составит:

$$\Delta H_{298}^{\text{Al}} = 1674,4 - 3 \cdot 264,5 = 881,0 \text{ кДж/моль.}$$

Следовательно, количество экзотермической смеси от взаимодействия алюминия с закисью железа может быть определено из выражения:

$$Q_{\text{э.с}}^{\text{Al}} = Q_{\text{FeO}} + 0,250 Q_{\text{FeO}} \quad (2)$$

Тепловой эффект от 1 г экзотермической смеси (алюминия и оксида железа) составит:

$$q^{\text{Al}} = \frac{881000}{269,51} = 3268 \text{ Дж/г,} \quad (3)$$

где 269,51 – сумма молекулярных масс исходных веществ, г.

Расчитанные аналогичным образом тепловые эффекты на 1 г экзотермической смеси для реакций титана, кремния и марганца с оксидом железа составят:

$$q^{\text{Ti}} = 2171,1 \text{ Дж/г; } q^{\text{Si}} = 2224,7 \text{ Дж/г; } q^{\text{Mn}} = 950,8 \text{ Дж/г.} \quad (4)$$

Следовательно, с целью повышения скорости плавления (производительности) электродов более эффективным является введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси в виде окалина и алюминиевого порошка.

Однако, в настоящий момент, данные о влиянии экзотермической смеси на показатели плавления электродов и распределение тепла, выделяемого при экзотермической реакции, проходящей между электродом и изделием, ограничены [6–8]. Скорость или производительность плавления электрода, оцениваемая в основном изменением длины или массы расплавленного стержня электрода в единицу времени, является важной характеристикой сварочного процесса и зависит от многих факторов, главными из которых являются: сила сварочного тока, состав покрытия, род и полярность тока.

Для исследований влияния количества экзотермической смеси на технологические характеристики плавления электродов изготавливались электроды с диаметром стержня 5,0 мм и коэффициентом массы покрытия 0,6. Расплавление электродов выполнялось при одинаковых значениях силы (290 А) и плотности (24,8 А/мм²) сварочного тока и напряжении холостого хода источника питания 60 В [8, 9].

Для определения влияния толщины покрытия электродов с экзотермической смесью на технологические характеристики их плавления изготавливались электроды с диаметром



стержня 5,0 мм и толщиной покрытия 0,5...2,6 мм, что соответствовало изменению коэффициента массы покрытия (0,17...1,14). Количество экзотермической смеси в исследуемых электродах составляло 44,4 % от массы покрытия.

Расчитанные показатели плавления электродов в зависимости от количества экзотермической смеси в покрытии (рис. 1, а) показывают, что введение в электродные покрытия экзотермической смеси до 53,4 % приводит к увеличению коэффициентов: расплавления стержня ($\alpha_{p.ст.} = 8,7...11,4$ г/А·ч), наплавки ($\alpha_n = 8,2 ...12,5$ г/А·ч), скорости плавления электродов (17...23 м/ч) и расплавления покрытия электродов (0,4...0,6 г/с).

Повышение толщины покрытия электродов (рис. 1, б) приводит к увеличению количества экзотермической смеси (3,9 ...27,4 г), восстановленного железа (0,05...0,28 г/с), коэффициентов наплавки ($\alpha_n = 10,4...13,4$ г/А·ч), к снижению коэффициентов расплавляемого стержня ($\alpha_{p.ст.} = 12,8...10,5$ г/А·ч), увеличению массовой скорости плавления покрытия (0,18...1,03 г/с), снижению скорости плавления электрода (21,5...18,2 м/ч).

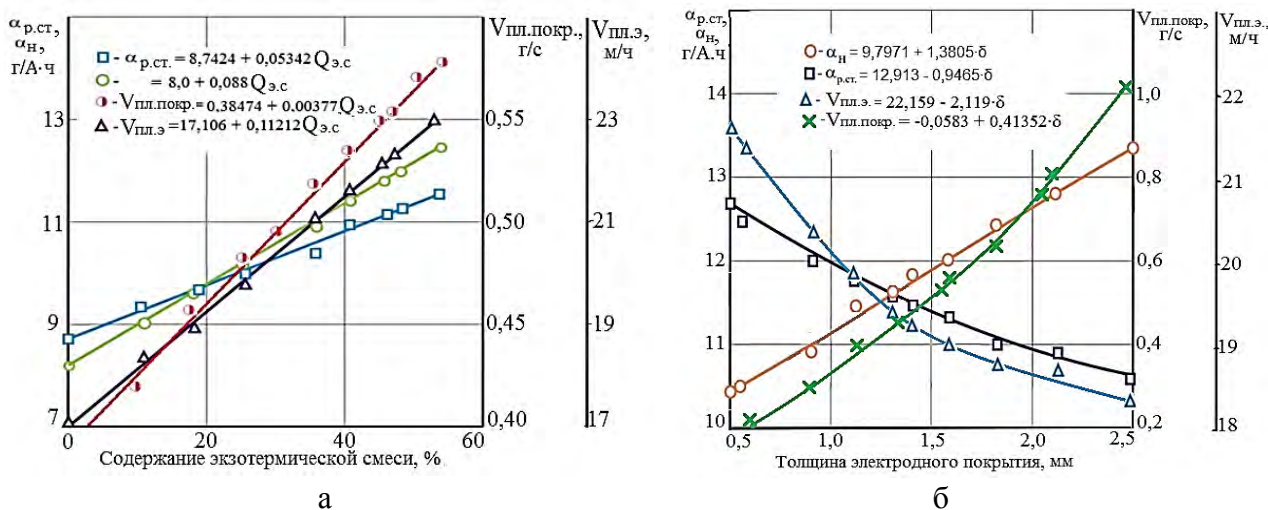


Рис. 1. Показатели плавления электродов:

а – в зависимости от количества экзотермической смеси в покрытии электродов; б – в зависимости от толщины покрытия электродов

Несмотря на снижение количества расплавляемого стержня, с увеличением толщины покрытия электродов, количество наплавленного металла увеличивается, что возможно только при условии интенсивного восстановления железа из его оксида. Уменьшение же $\alpha_{p.ст.}$ с увеличением толщины покрытия говорит о том, что теплота, образующаяся при протекании экзотермической реакции, расходуется в основном на плавление покрытия, увеличивая его массовую скорость плавления (0,18...1,03 г/с). Кроме того, часть тепла покрытию передается от стержня, вследствие чего снижается нагрев стержня и его скорость плавления. В связи с тем, что во всех исследованных составах электродов процентное содержание экзотермической смеси было одинаково, а изменялось её только массовое количество, то происходило лишь увеличение восстанавливаемого железа из его оксидов и повышение производительности расплавления покрытия электродов.

Определению эффективных КПД нагрева изделия и электрода, а также теплосодержания электродного металла и шлака посвящено ряд работ [10–12]. Однако исследователями до настоящего времени не изучен вопрос распределения тепла, выделяемого при экзотермической реакции между электродом и изделием. Для исследований изготавливались электроды с диаметром стержня $5,0 \cdot 10^{-3}$ м в двух вариантах: в одном – с различным содержанием



в покрытии экзотермической смеси при постоянном значении Kn , а в другом – с различной толщиной покрытия $(0,5...2,6) \cdot 10^{-3}$ м, что соответствовало изменению Kn $(0,17...1,14)$ при неизменном количестве в покрытии экзотермической смеси (44,4 %).

Расчитанные значения эффективных КПД нагрева электрода ($\eta_э$) и основного металла (η_u) и связанных с ними характеристик приведены на рис. 2.

Введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси до 53,4 % (рис. 2, а) изменяет η_u $(0,715...0,815)$ и $\eta_э$ $(0,28...0,415)$.

Увеличение количества наплавленного металла, расплавляемого стержня и покрытия, тепловой мощности дуги (при почти одинаковом количестве шлака на пластине) показывает, что дополнительный нагрев пластины происходит в основном за счёт увеличения количества электроодного металла за один и тот же промежуток времени и за счет увеличения тепловой мощности дуги.

С изменением толщины покрытия электродов $(0,5...2,6)10^{-3}$ м (рис. 2, б) повышается содержание экзотермической смеси; увеличивается количество тепла и восстановленного железа при протекании экзотермической реакции.

Количество наплавленного металла и шлака на основном металле при калориметрировании повысилось, соответственно, с 17,5 до 21,0 г и от 2,0 до 13,0 г, что привело к изменению η_u $(0,74...0,84)$; пропорциональное повышение $\eta_э$ $(0,31...0,47)$, несмотря на снижение их скорости плавления, происходит из-за увеличения тепловой мощности дуги и удельных затрат теплоты $(K_э + K_э^{хим})$ на плавление электрода.

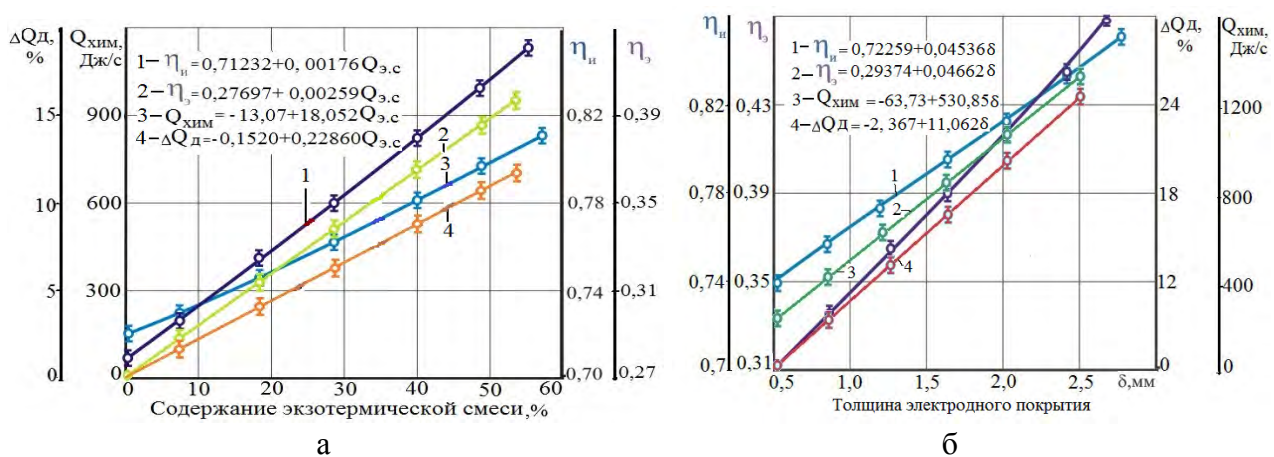


Рис. 2. Зависимость тепловых характеристик плавления:

а – от количества экзотермической смеси в покрытии электродов; б – от толщины покрытия

Проведенные исследования показывают, что введение в покрытие экзотермической смеси увеличивает скорость расплавления электрода за счет: увеличения тепловой мощности дуги; тепла, выделяющегося при протекании экзотермической реакции; снижения затрат на плавление покрытия и улучшения технологических характеристик дуги.

Состав и свойства наплавленного металла (слоя) зависят от условий эксплуатации изделия, и его выбор является сложной задачей, так как износ протекает по-разному в зависимости от условий работы.

Наплавленный материал выбирается с учетом ведущего вида износа при эксплуатации, которому уделяется основное внимание.

В настоящее время наибольшее практическое значение имеет классификация наплавленного металла по химическому составу и структурным признакам. Характерные структуры, твердость и назначения наплавленного металла применительно к изделиям, работающим при высоких температурах, приведены в табл. 1 .



Таблица 1

Химический состав, твердость и назначение наплавленного металла разных типов

Группа	Тип	Химический состав, %	Твердость	Структура	Назначение
2	Нелегированные и низколегированные стали, > 0,4 % С	C > 0,4, Si ≤ 1,0, Ni ≤ 3,0, Mn = 0,5...3,0, Cr ≤ 3,0, Mo ≤ 1,0	52...60 HRC	Мартенсит, остаточный аустенит, игольчатый троостит и карбиды	Наплавка инструмента для горячего и холодного деформирования металла, рабочих органов дорожных и строительных машин
3	Хромовольфрамовые, хромомолибденовые и другие теплостойкие инструментальные стали	C = 0,2...0,5, Si ≤ 1,0, Ni ≤ 5,0, V = 0,2...1,5, Mn ≤ 0,2, Cr = 1,0...5,0, W = 1,0...10,0, Mo ≤ 1,0	52...60 HRC	Мартенсит, остаточный аустенит и карбиды	Наплавка деталей металлургического оборудования, работающего в условиях циклических теплосмен, переменных силовых нагрузок (валки горячей прокатки, ножи горячей резки, штампы горячей штамповки, ролики рольгангов)

В условиях эксплуатации наплавленного изделия при высоких температурах наплавленный металл должен иметь и высокую теплостойкость вместе с высокой износостойкостью. Это достигается дополнительным легированием сильными карбидообразующими элементами – вольфрамом, молибденом, ванадием. Распространены сплавы мартенситно-карбидного класса Fe – C – Cr – W (группа 3, табл. 1).

К теплостойкому наплавленному металлу группы 3 можно отнести и экономно легированный (безвольфрамовый) наплавленный металл Х5МФ. Такой наплавленный металл принадлежит к мартенситно-карбидному классу, но в зависимости от конкретных условий наплавки и дальнейшей термической обработки матрица может иметь структуру бейнита, троостита, сорбита и перлита закалки, а также структуру продуктов распада мартенсита – троостита отпуска или сорбита отпуска.

Электроды для наплавки выбираются в зависимости от технологии наплавки и условий работы наплавленного металла. Свойства наплавленного металла зависят от предварительного подогрева, методов наплавки, погонной энергии, условий охлаждения, массы и химического состава, термической обработки. Поэтому при наплавке одними и теми же электродами, можно получить металл, обладающий различными свойствами. Необходимые свойства обеспечиваются соответствующей системой легирования.

Для наплавки рассматриваемой номенклатуры изделий рекомендуются электроды: ОЗШ-1, ОЗШ-2, ОЗШ-6, ЦН-14, КПИ ГШ-1 (штампы для горячей штамповки) и ОЗИ-3, ОЗИ-4, ОЗИ-5, ЦИ-1М, КПИ РИ-1 (высокое давление, удары, скольжение, окислительная атмосфера, теплосмены, штампы горячей штамповки).

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси до 53,4 % увеличивает коэффициенты: наплавки ($\alpha_n = 8,4...12$, г/А·ч), расплавления стержня (8,7...11,4 г/А·ч), выхода наплавленного (0,93...1,10) и годного металла (0,58...0,68), скорости плавления электродов ($V_{пл} = 17...23$ м/ч), изменяет $\eta_u(0,715...0,815)$ и $\eta_s(0,28...0,415)$.



Експериментально установлено, что повышение толщины покрытия электродов приводит к увеличению количества экзотермической смеси (3,9...27,4 г), восстановленного железа (0,05...0,28 г/с), коэффициентов наплавки ($\alpha_n = 10,4...13,4$ г/А·ч), к снижению коэффициентов расплавляемого стержня ($\alpha_{p,cm} = 12,8...10,5$ г/А·ч), увеличение массовой скорости плавления покрытия (0,18...1,03 г/с), снижению скорости плавления электрода (21,5...18,2 м/ч), к изменению $\eta_u(0,74...0,84)$ и $\eta_s(0,31...0,47)$.

Введение в покрытие электродов экзотермической смеси повышает скорость расплавления электродов за счет: увеличения тепловой мощности дуги (0...12 %); тепла, выделяющегося при протекании экзотермической реакции (0...11,5 %); снижения затрат на плавление газошлакообразующей части покрытия и улучшения технологических характеристик дуги.

Введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси способствует повышению производительности ручной дуговой наплавки изделий, работающих при высоких температурах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинов Л. С. Перспективные экономнолегированные наплавочные материалы, обеспечивающие получение наплавочного металла с мартенситными превращениями : тезисы докладов научного семинара «Современные достижения в области сварки, наплавки и родственных технологий» / Л. С. Малинов ; отв. редактор В. А. Роянов. – Мариуполь : 2000. – С. 86–90.
2. Малинов Л. С. Перспективные экономнолегированные стали и чугуны с мартенситными превращениями и наплавочные материалы на их основе / Л. С. Малинов // *Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. праць.* – Вип. 5. – Мариуполь, 2000. – С. 238–244.
3. Кошевой А. Д. Повышение износостойкости рабочих поверхностей пресового инструмента / А. Д. Кошевой, В. А. Пресняков // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : зб. наук. праць.* – Краматорськ-Словянськ, 2000. – С. 473–476.
4. Власов А. Ф. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко, А. М. Куций // *Автоматическая сварка.* – 2014. – № 6. – С. 151–154.
5. 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.
6. Власов А. Ф. Нагрев и плавление электродов при наличии экзотермической смеси в покрытии / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко // *Сборник научных трудов НУК.* – Николаев, 2014. – С. 84–88.
7. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, А. И. Леценко // *Вісник LLVF : зб. наук. праць.* – Краматорськ, 2006. – № 2(4). – С. 65–68.
8. A. F. Vlasov and A. M. Kushchii. Technological characteristics of electrodes with an exothermic mixture coating for surfacing of tool steels // *Welding International.* – Vol. 26, No. 9, September 2012. – P. 713–717.
9. Власов А. Ф. Высокопроизводительные электроды на новом связующем для наплавки углеродистых легированных сталей / А. Ф. Власов, В. А. Пресняков, А. М. Куций // *Вісник ДДМА : зб. наук. праць.* – Краматорськ, 2011. – № 1(22). – С. 26–29.
10. Попков А. М. Влияние дополнительного подогрева электрода на ввод тепла в свариваемое изделие / А. М. Попков, Ж. Е. Абилов // *Сварочное производство.* – 1975. – № 2. – С. 4–5.
11. Безбах Д. К. Эффективная тепловая мощность дуги при некоторых способах сварки плавящимся электродом / Д. К. Безбах // *Сварочное производство.* – 1967. – № 3. – С. 8–9.
12. Безбах Д. К. Эффективный КПД нагрева изделия сварочной дугой при работе на ветру / Д. К. Безбах // *Сварочное производство.* – 1970. – № 10. – С. 2–3.

