УДК 621.791.927.5

Макаренко Н. А., Богуцкий А. А., Грановская Н. А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И ПРЕССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА РАЗНОПОЛЯРНОМ ТОКЕ

В кузнечно-прессовом и металлургическом производстве повышение стойкости и восстановление изношенных деталей машин, штампов, инструмента оснастки различного назначения является актуальной задачей.

Важную роль в решении данных задач играют процессы наплавки [1–3]. Основной объем наплавочных работ осуществляется с помощью автоматической наплавки под слоем флюса, а также автоматической и полуавтоматической наплавки в среде защитных газов проволоками как сплошного сечения, так и порошковыми проволоками.

В тоже время, ряд деталей восстановить данными способами весьма затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно. Кроме того, восстановление ряда деталей включает в себя высокотемпературный (более 1100 °С) отжиг и закалку (при таких же температурах). Большая глубина проплавления основного металла не позволяет получить металл заданного химического состава в первом наплавленном слое, что ведет к значительным расходам дорогостоящих наплавочных материалов, увеличивает расход электроэнергии и повышает трудоемкость наплавочных процессов.

Актуальность повышения эффективности процессов наплавки и срока службы наплавленных изделий в металлургическом и кузнечно-прессовом производстве в связи с вышеизложенным очевидна.

Целью данной работы является исследование процесса плазменно-порошковой наплавки деталей кузнечно-прессового и металлургического производства, разработка технологического процесса плазменной наплавки быстрорежущей безвольфрамовой стали 100Х4М5Ф2.

Плазменно-порошковая наплавка нашла достаточно широкое применение в промышлености [1–4], начиная с 60-х годов прошлого века. Наиболее хорошие результаты достигаются при использовании самофлюсующихся сплавов на основе никеля или кобальта (таких, как наплавочные сплавы типа N и Q [5–7]). Данные сплавы обладают высокими антикоррозионными свойствами, износостойкостью и антифрикционными характеристиками, кроме того, несомненным достоинством этих сплавов является их высокая растекаемость по металлу наплавляемого изделия [2]. Основным их недостатком является высокая стоимость, превышающая стоимость сплавов на железной основе в 10–20 раз. Кроме того, никелевые и кобальтовые сплавы не пригодны для ряда деталей (вырубных штампов, роликов рольгангов для транспортировки горячего металла, так как их разупрочнение наступает при температурах 500–600 °С в зависимости от марки порошка).

Наплавочные материалы на основе железа свободны от данных недостатков, но обладают значительно худшей растекаемостью по наплавляемой поверхности, вследствие чего в наплавленном слое имеются дефекты [2].

На смачивающую способность жидким присадочным материалом основного металла изделия существенное влияние оказывают чистота поверхности изделия и наличие активных элементов-раскислителей в наплавочном материале, в связи с чем весьма перспективным материалом для наплавки является безвольфрамовая быстрорежущая сталь 100Х4М5Ф2,

содержащая молибден. Высокие характеристики данной стали позволяют применять ее для наплавки штампового инструмента, в т. ч. вырубных пуансонов и других деталей, подверженных интенсивному износу и воздействию высоких температур. Входящий в состав стали молибден способен восстанавливать оксиды металлов, обеспечивая самофлюсующие свойства жидкому присадочному металлу:

$$3FeO + Mo \rightarrow MoO_3 + 3Fe. \quad (1)$$

Известно [6], что оксид молибдена, образующийся в результате реакции (1) и имеющий температуру кипения 1250 °С, (при температурах, свойственных плазменной наплавке, является газообразным веществом) не остается в зоне наплавки.

Обеспечение чистоты поверхности в процессе плазменной наплавки в среде аргона возможно достигнуть за счет применения постоянного тока обратной полярности [2, 9–12], при применении которого очистка поверхности обеспечивается за счет эффекта катодного распыления, что особенно важно при многослойной наплавке, наплавке с частичным перекрытием валиков – наиболее распространенными технологическими приемами наплавки.

В тоже время, плазмотроны для наплавки на обратной полярности имеют сложную громоздкую конструкцию, при этом рассчитаны на небольшие токи (обычно до 150А) [12], что связано со значительно большими (по сравнению с плазмотронами для прямой полярности) тепловыми нагрузками на неплавящийся электрод плазмотрона.

Известны также плазмотроны, работающие на переменном токе [13]. При применении переменного тока тепловые нагрузки в неплавящийся электрод плазмотрона значительно выше, чем при постоянном токе прямой полярности, но все же допускают применение неплавящегося электрода стержневого типа, хотя и увеличенного диаметра. Однако применение переменного тока ограничивается сварочными процессами (в основном применительно для соединения легких металлов), где степень сжатия дуги выше, чем при наплавке (соответственно выше температура плазменной дуги и степень ионизации газа в ней). В виду более низкой степени ионизации газа при наплавке при смене полярности тока имеют место значительные бестоковые паузы и дуга становится нестабильной, что приводит к необходимости применения в установке стабилизатора горения дуги. Кроме того, при наплавке на переменном токе смена полярности тока происходит с фиксированной частотой – 50 Гц, что ограничивает технологические возможности процесса наплавки, в связи с чем целесообразно применение разнополярно-импульсного тока для питания плазменной дуги. Такой ток имеет форму импульсов, близкую к прямоугольной, что обеспечивает быстрый переход через ноль, а применение современных силовых транзисторов (в качестве коммутирующих элементов) позволяет сократить длительность паузы между импульсами до нескольких нс, что обеспечивает высокую стабильность горения плазменной дуги. Применение разнополярно-импульсного режима горения плазменной дуги позволяет существенно расширить технологические возможности плазменно-порошковой наплавки.

Кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» Донбасской государственной машиностроительной академией разработана установка плазменно-порошковой наплавки ТОР-160 (предназначенная для наплавки на разнополярно-импульсном токе), которая позволяет регулировать частоту разнополярно-импульсного тока в пределах 12–420 Гц и обеспечивает независимую регулировку токов прямой и обратной полярности (рис. 1). Установка включает в себя систему автономного охлаждения плазмотрона антифризом. Силовая часть установки (рис. 2) создана на основе силового трансформатора выпрямителя ВДУ-506. Данный трансформатор имеет три пары вторичных обмоток, что позволяет собрать два гальванически развязанных между собой выпрямительных блока.

Регулировка тока каждой полярности осуществляется дросселями насыщения L1 и L2 (независимо друг от друга). Выпрямительные блоки собраны по схеме Ларионова и имеют на выходе конденсаторы С1 и С2, необходимые для быстрого нарастания тока в начале импульса,

что повышает стабильность горения дуги (так как наличие в цепи значительной индуктивности (дросселем насыщения) ухудшает динамические характеристики блоков прямой и обратной полярности). Токоограничивающие резисторы R1 и R2 служат для ограничения тока силовых транзисторов до величины ниже предельной IGBT (при возможных случайных коротких замыканиях в сварочной цепи). В качестве транзисторов VT1 и VT2 использован модуль полумоста, состоящий из двух силовых IGBT-транзисторов.

Рис. 1. Разработанная установка ТОР-160

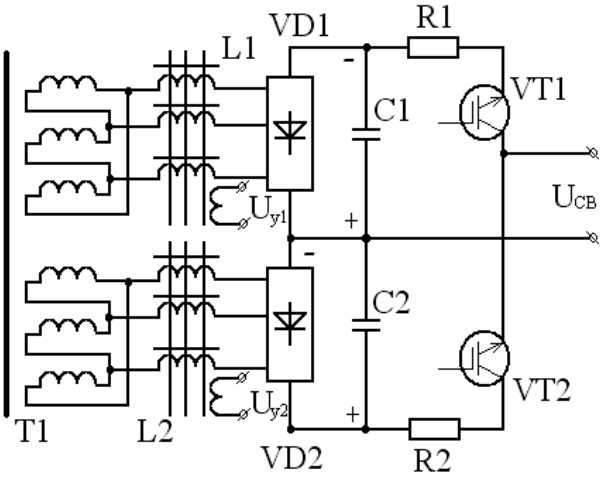


Рис. 2. Схема силовой части установки ТОР-160:

T1 – силовой трансформатор; L1, L2 – дроссели насыщения; VD1, VD2 – трехфазные мостовые выпрямители; C1, C2 – конденсаторы; R1, R2 – токоограничивающие резисторы; VT1, VT2 – модуль полумостовой на IGBT транзисторах

Данная схема установки позволяет изменять в широких пределах длительности импульсов прямой и обратной полярности, частоту их следования и ток дуги при прямой и обратной полярности.

Необходимо отметить, что параметры импульсов токов прямой и обратной полярности (а именно: их длительности и силы токов во время импульсов) зависят от ряда факторов.

Так, при обратной полярности тока плазменной дуги нагрев неплавящегося электрода значительно выше, чем при прямой, что вызывает его значительный износ и создает возможность перехода вольфрама в наплавленный металл.

Быстрое разрушение вольфрамового электрода ведет не только к перерасходу дорогостоящего вольфрама, но и к необходимости прерывать процесс наплавки для переточки электрода и его установки в плазмотрон. В тоже время, именно во время импульсов тока обратной полярности имеет место катодная очистка поверхности наплавляемого изделия (таким образом, параметры импульсов токов следует выбирать, исходя из данных критериев). Немаловажным параметром разнополярно-импульсного режима является его частота, в связи с чем были проведены исследования влияния параметров наплавки на сварочную ванну при одинаковой длительности импульсов тока прямой и обратной полярности.

Известно [14], что при сварке током частотой, близкой к резонансной частоте сварочной ванны, достигается ряд положительных эффектов: уменьшение размеров зерна, выравнивание микроструктуры по сечению шва и др.

При наплавке подобные изменения в металле наплавленного валика особенно важны в случаях, когда изделие после наплавки не подвергается последующей термической обработке (отжигу или закалке). Кроме того, в таких изделиях снижается вероятность образования трещин по оси наплавленного валика. Проведенные по методике [14] расчеты показали зависимость резонансной частоты ванны от ее ширины, то есть от ширины наплавленного валика.

Для удобства выбора режимов наплавки данная зависимость представлена в виде табл. 1.

Таблица 1

Зависимость частоты собственного резонанса жидкой металлической ванны от ее диаметра (ширины наплавленного валика)

Диаметр ванны Д, мм	1	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
Резонансная частота, Гц	36	40	45	50	57	66	77	92	112	142	187	261

Вычисленные (согласно [14]) частоты собственного резонанса жидкой металлической ванны являются ориентировочными, однако анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет сделать вывод, что частоты резонанса ванн диаметрами 4–12 мм (наиболее характерных для плазменно-порошковой наплавки) значительно превышают частоту переменного тока в 50 Гц. Таким образом, применение переменного тока промышленной частоты для плазменной наплавки не обеспечит эффекта измельчения зерна и улучшения микроструктуры наплавленного валика.

Следует отметить, что существенное отличие в силах тока прямой и обратной полярности приведет к значительному изменению давления дуги на жидкую металлическую ванну, то есть к увеличению амплитуды колебаний в ней (на частотах, близких или равных частоте резонанса).

С целью проверки данного предположения производили наплавку стали 100Х4М5Ф2 на образцы из стали 20 диаметром 60 мм на параметрах режима, представленных в табл. 2.

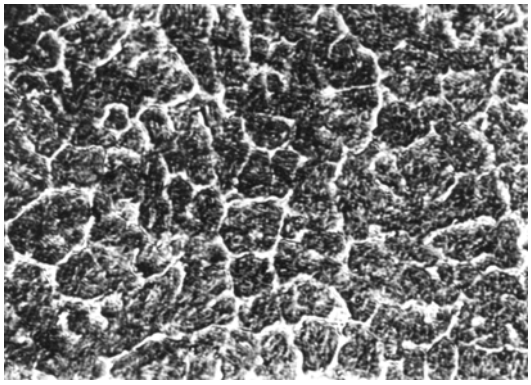
Таблица 2

Режимы плазменно-порошковой наплавки стали 100Х4М5Ф2

№	$V_Н$, м/ч	$I_{ПР}$, А	$U_{ПР}$, В	$I_{ОБР}$, А	$U_{ОБР}$, В	Диаметр ванны (ширина валика) D, мм	f, Гц
1	16	180	17	–	–	8,2	–
2	16	280	21	80	24	7,8	120

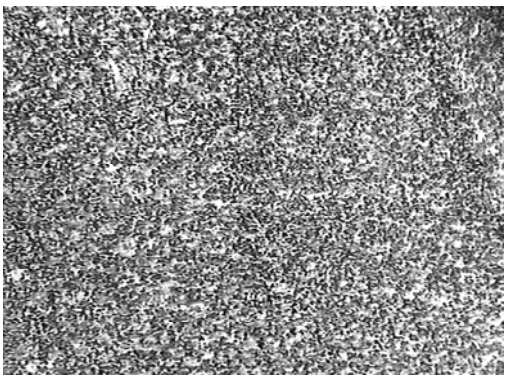
При обоих режимах расход плазмообразующего газа аргона составлял 2,4 л/мин, защитного – 12 л/мин, диаметр сопла – 5,6 мм, расстояние от сопла до изделия – 11 мм, наплавка производилась в вертикальном положении при горизонтальной оси плазмотрона – «снизу-вверх».

Наплавленные сталью 100Х4М5Ф2 образцы не подвергались какому-либо виду термообработки, а их микроструктура исследовалась методами металлографии. На рис. 3 представлена микроструктура образца, наплавленного в непрерывном режиме на прямой полярности тока плазменной дуги, на рис. 4 – микроструктура, полученная при наплавке на разнополярно-импульсном токе.



× 400

Рис. 3. Микроструктура стали 100Х4М5Ф2, наплавленной плазменно-порошковой наплавкой постоянным током прямой полярности

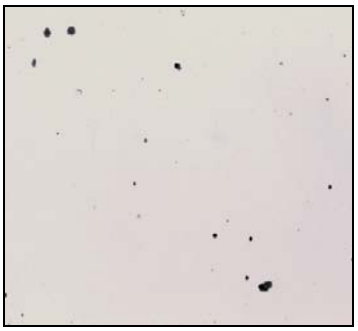


× 400

Рис. 4. Микроструктура стали 100Х4М5Ф2, наплавленной плазменно-порошковой наплавкой разнополярно-импульсным током

Металлографические исследования показали, что количество неметаллических включений в наплавленном металле при применении разнополярно-импульсного тока существенно меньше, чем при применении постоянного тока прямой полярности (рис. 5), что связано (как объяснено выше) с эффектом катодной очистки поверхности изделия в моменты следования импульсов обратной полярности.

а



б

Рис. 5. Неметаллические включения в наплавленном металле (× 400):
а – при плазменно-порошковой наплавке постоянным током прямой полярности; б – при плазменно-порошковой наплавке разнополярно-импульсным током

Была произведена опытная наплавка ряда других сталей (рис. 6) с целью испытаний результата разработки в производственных условиях.

Производственные испытания показали, что стойкость деталей, наплавленных на разнополярно-импульсном токе, оказалась в среднем на 30 % выше, чем деталей, наплавленных

в непрерывном режиме постоянным током прямой полярности. Необходимо отметить, что особенно заметным являлось повышение стойкости наплавленных деталей в случае многослойной наплавки, в связи с тем, что при других методах нанесения многослойного покрытия поверхность наплавленного валика при выходе ее из зоны обдува защитного аргона интенсивно окисляется и при наплавке последующего слоя оксиды попадают в наплавленный металл в значительном количестве. В случае же применения разнополярно-импульсного тока происходит удаление этого слоя оксида.

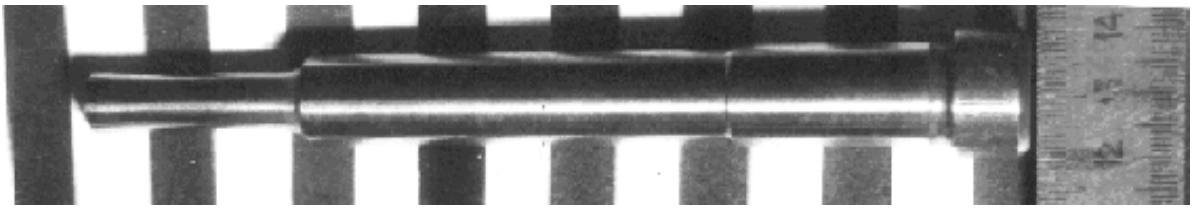


Рис. 6. Пуансон, наплавленный на разнополярно-импульсном токе

Визуальным наблюдением за процессом наплавки установлено, что разрушение оксидного слоя происходит весьма интенсивно, при этом крупные части оксидного слоя, отрывающиеся от окисленной поверхности, отскакивают в стороны от оси валика. Такое разрушение наблюдается в зоне, непосредственно расположенной перед плазменной дугой (то есть до плавления основного металла).

Также об эффективности очистки металла от окислов можно судить по образованию вдоль валика (по его краям) полосок блестящего металла, хотя сам наплавленный металл оказывается покрытым слоем оксидов, образовавшихся на его поверхности после выхода нагретого до высокой температуры металла из зоны защиты аргоном. Из-за проявления эффекта катодной очистки наплавленные детали имеют характерный внешний вид (рис. 7).

Рис. 7. Наплавленный клапан двигателя тепловоза

Последний наплавленный валик покрыт толстым серым слоем оксидов, в то время как предыдущие валики свободны от оксидов, вокруг валиков видны блестящие полоски металла, появившиеся в результате интенсивной катодной очистки.

Целесообразно продолжить исследования процесса плазменно-порошковой наплавки разнополярно-импульсным током стали 100Х4М5Ф2 с целью оптимизации режимов наплавки, определения влияния параметров режима на служебные характеристики наплавленного слоя, совершенствование оборудования для плазменной наплавки для обеспечения снижения энергозатрат, себестоимости и повышения эффективности процесса. Необходимо также

оптимизировать состав быстрорежущей безвольфрамовой стали с учетом особенностей процесса плазменной наплавки и условий эксплуатации, что позволит повысить срок службы деталей, наплавленных данной сталью, и снизить себестоимость их восстановления и упрочнения, а также расширить область применения наплавки.

ВЫВОДЫ

Установлено, что применение плазменно-порошковой наплавки разнополярно-импульсным током безвольфрамовой быстрорежущей стали 100Х4М5Ф2 позволяет повысить стойкость наплавленных деталей на 30 % по сравнению с плазменной наплавкой на постоянном токе прямой полярности. Испытания показали, что для изменения полярности тока плазменной дуги целесообразно применять коммутатор на основе силовых IGBT-транзисторов. Доказано, что при плазменно-порошковой наплавке разнополярно-импульсным током в наплавленном металле снижается количество неметаллических включений оксидного характера.

Проведенные исследования показали целесообразность смены полярности тока с частотой, близкой к собственной частоте резонанса жидкой металлической ванны, что приводит к измельчению зерна в наплавленном металле и повышает его служебные характеристики.

Определено, что уменьшение значения тока обратной полярности (по сравнению с током прямой полярности плазменной дуги) увеличивает эффективность резонансных явлений в жидкой металлической ванне.

Промышленные испытания и проведенные исследования показали, что для восстановления деталей инструмента и оснастки в кузнечно-прессовом и металлургическом производстве целесообразно применять плазменно-порошковую наплавку стали 100Х4М5Ф2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнерман А. Е. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В. Д. Веселков. – Л. : Машиностроение, 1969. – 192 с.

2. Сидоров А. И. Восстановление деталей машины напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.

3. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. – К. : Екологія, 2007. – 292 с.

4. Plasma hardfacing adds to volve life // Australien Welding Jounal. – 1977. – № 3. – P. 19.

5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

6. Ву Дж Б. С. Износо- и коррозионностойкие сплавы на основе кобальта для наплавки / Б. С. Ву Дж, А. В. Павленко // Автоматическая сварка. – 2004. – № 10. – С. 44–48.

7. Технология плазменно-порошковой наплавки выпускных клапанов двигателей автомобилей «ВАЗ» / С. Р. Анапов, А. В. Коргин, Д. Ю. Копылов, Б. Н. Переведенцев // Сварочное производство. – 2005. – № 2. – С. 33–40.

8. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – М. : Металлургия, 1978. – 472 с.

9. Данилов А. И. Плазменная наплавка постоянным током обратной полярности / А. И. Данилов. – Л. : ЛДНТП, 1981. – 20 с.

10. Способ высококачественной наплавки «мягкой» плазменной дугой обратной полярности / Хисаси Сусуму Симота, Сейката Хираку, Дзюн Укои // Есецу гидзюцу. – Welding Technologie. – 1978. – 26. – № 4. – С. 63–69.

11. Астахин В. И. Плазмотрон для сварки и наплавки алюминия / В. И. Астахин // Сварочное производство. – 1978. – № 2. – С. 53–54.

12. Восстановление алюминиевых поршней тракторных двигателей плазменной наплавкой / А. И. Сидоров, В. И. Астахин, Г. А. Полюшков, В. М. Калашников // Сварочное производство. – 1982. – № 9. – С. 27–28.

13. Дудко Д. А. Тепловая эффективность процесса сварки плазменной дугой переменного тока / Д. А. Дудко, А. Н. Корниенко // Автоматическая сварка. – 1967. – № 11. – С. 27–30.

14. Особенности дуговой сварки переменным током низкой частоты / В. В. Андреев, Г. М. Москович, А. М. Жерносеков, Л. Г. Шитова // Сварщик. – 2008. – № 6. – С. 19–21.