

**И.А. Гилев, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, С.Д. Неулыбин**  
**I.A. Gilev, D.S. Belinin, P.S. Kuchev, S.D. Neulybin**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ НАПЛАВКИ МЕДИ**

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF COPPER SURFACING METHODS**

Представлены результаты сравнительного анализа существующих способов наплавки меди. Проведены экспериментальные исследования по плазменной наплавке меди.

There are shown the results of a comparative analysis of existing copper surfacing methods. There were performed experimental researches on plasma copper surfacing.

**Ключевые слова:** наплавка, медь, плазменная наплавка, плазматрон, полярность, микроструктура.

**Keywords:** surfacing, copper, plasma welding, plasmatron, polarity, microstructure.

В различных областях современной техники широкое применение находит медь. В настоящее время наплавка меди на стали и чугуны применяется для восстановления изношенных и получения новых биметаллических деталей машин.

По технологии наплавки детали делятся на пять групп: 1) с плоскими наплавляемыми поверхностями, 2) цилиндрической формы с наружными или внутренними наплавляемыми поверхностями, 3) в форме диска с боковыми наплавляемыми поверхностями, 4) конусной формы с наружными или внутренними наплавляемыми поверхностями, 5) типа сфер с внутренними или наружными наплавляемыми поверхностями [1].

Наплавка меди применяется в таких областях, как судостроение, химическая промышленность, автомобильная, целлюлозно-бумажная, текстильная и пищевая промышленность и т.д. Она используется для ремонта усадочных раковин, дефектов литья, наплавки на седла клапанов, вкладышей подшипников, стержней и червячных передач, наплавки на гребные винты корабля и насосы, токоведущие шины, подшипники и лопастные затворы, теплообменники, испарители и дистилляторы.

Целью данной работы являлось проведение сравнительного анализа существующих способов наплавки меди, анализ полученных результатов и проведение экспериментальных исследований по плазменной наплавке.

На сегодняшний день для изготовления сварных конструкции из меди и ее сплавов получила развитие автоматическая наплавка под флюсом, которая успешно применяется при серийном и массовом производстве изделий. В связи с необходимостью изготовления крупногабаритных металлоемких конструкций из меди больших толщин и сечений разработаны высокопроизводительные процессы сварки плавлением – плазменно-дуговой и электрошлаковый.

Недостатками электрошлаковой наплавки является широкая зона термического влияния, что вызвано медленным нагревом и охлаждением металла. Это часто приводит к образованию крупнозернистой структуры и требует термообработки для получения необходимых свойств сварного соединения [2].

Метод плазменно-дуговой наплавки является одним из перспективных направлений совершенствования сварочных технологий, отвечающих современным требованиям. Благодаря уникальным качествам сжатой дуги и плазменной струи как источника нагрева обрабатываемой зоны они обеспечивают не только тепловое, но и мощное силовое воздействие на зону обработки. Удачное сочетание высокой мощности и концентрации энергии в сжатой дуге делает метод плазменно-дуговой наплавки наиболее технологически и экономически выгодным [3].

При изготовлении сварных конструкций из меди необходимо учитывать ряд особенностей, затрудняющих этот процесс:

1. Высокая теплопроводность меди. Это вызывает необходимость применения концентрированных источников нагрева, и во многих случаях – предварительного и сопутствующего подогрева основного металла при сварке.

2. Легкая окисляемость меди в расплавленном состоянии. При этом образуется оксид меди  $Cu_2O$ , который растворяется в жидкой меди и образует в ней эвтектический сплав с более низкой температурой плавления, чем у чистой меди, легкосплавная эвтектика при кристаллизации выделяется в виде самостоятельной фазы, которая, располагаясь по границам зерен, снижает стойкость металла шва к кристаллизационным трещинам.

3. Высокий показатель растворимости водорода в расплавленной меди.

4. Высокий коэффициент линейного расширения меди (в 1,5 раза больше, чем у стали).

5. Высокий показатель жидкотекучести расплавленного металла [4].

На сегодняшний день существует целый ряд технологий по наплавке меди (таблица).

### Технологии наплавки меди

Вид сварки	Области применения	Достоинства метода	Недостатки метода
Автоматическая сварка под флюсом	Сварка в цеховых и монтажных условиях, наплавка металлов от 1,5 до 10 мм	Повышенная производительность, минимальные потери электродного металла (не более 2 %), отсутствие брызг, максимально надежная защита зоны сварки, высокие показатели механических свойств металла шва, малые затраты на подготовку кадров	Трудозатраты, связанные с производством, хранением и подготовкой сварочных флюсов, трудности коррекции положения дуги относительно кромок свариваемого изделия, неблагоприятное воздействие на оператора
Электродуговая сварка покрытыми электродами	Затрагивает все области применения	Широкое распространение, простота, низкая квалификация сварщика	Малая производительность
Сварка незащищенной дугой	Данный способ не нашел широкого применения	Стабильное горение дуги на воздухе, удовлетворительное формирование шва, отсутствие пор, трещин, металл шва не загрязняется газами атмосферы	Необходимость специальной легированной проволоки сплошного сечения, большая зависимость от квалификации сварщика
Сварка в защитных газах	Данный способ широко распространен во всех областях	Позволяет получить сварные соединения с наиболее высокими механическими и коррозионными свойствами благодаря минимальному содержанию примесей	Недостаточная мощность при наплавке меди
Газовая сварка	Применение в строительных и монтажных условиях, при ремонтных работах	Независимость от электрических источников питания, легко изменяется тепловложение в металл за счет изменения угла наклона горелки и ее расстояния до изделия	Низкая производительность, большая зона термического влияния, высокие требования к квалификации сварщика, плохая защита зоны сварки
Плазменная наплавка	Применяется во всех областях промышленности	Широкий диапазон регулирования, высокая концентрация тепловой энергии в плазменной струе, стабильность дугового разряда, возможность легкого раздельного регулирования степени нагрева основного и присадочного металлов, возможность получения высоких механических характеристик и характеристик коррозионной стойкости, высокая производительность	Необходима разработка надежного оборудования, низкая востребованность способа

Плазменная (плазменно-дуговая) наплавка – высокопроизводительный процесс сварки, при котором в качестве источника теплоты используют плазменную дугу – поток ионизационных частиц, обладающих большим запасом энергии. Температура плазменной струи достигает 20 000–30 000 К и выше. При плазменно-дуговой сварке дуга может быть двух видов: прямого и косвенного действия. Дуга, горящая между электродом и изделием, называется дугой прямого действия, а дуга, горящая между электродом и соплом, – дугой косвенного действия.

Выбор плазмообразующего газа определяется его физико-химическими свойствами, особенно такими как теплопроводность, теплоемкость, потенциалы. В качестве плазмообразующего газа при наплавке применяется аргон и гелий, дающие наиболее высокую температуру плазмы при наименьшем напряжении дуги, энергии, подводимой к дуге, и коэффициенте использования энергии на нагрев газов. Однако высокая теплопроводность гелия вместе с высоким теплосодержанием гелиевой плазмы приводит к быстрому нагреву и разрушению электродов, поэтому в качестве плазмообразующего газа лучше применять аргон.

В качестве защитного газа при плазменной наплавке могут применяться аргон, азот, углекислый газ и смеси аргона с гелием или азотом. Выбор защитного газа связан со степенью его воздействия на наплавляемый и основной металл, а также экономическими соображениями. При наплавке меди в качестве защитного газа применяется аргон и азот [5].

Плазменная наплавка имеет ряд преимуществ при соединении элементов из меди и ее сплавов больших толщин: возможность осуществления больших тепловложений в свариваемые кромок, сварка стыковых соединений без разделки кромок, минимальный объем механической обработки до и после сварки. В качестве плазмообразующего газа используют смесь аргона с гелием.

В ряде областей для соединения металлов малых толщин применяется микроплазменная сварка. Микроплазменная сварка осуществляется в основном на постоянном токе дугой прямой и обратной полярности. В качестве плазмообразующего газа применяется аргон, в качестве защитного газа используется гелий. Высокая сосредоточенность теплового потока малоамперной сжатой дуги обеспечивает большую производительность процесса микроплазменной сварки.

Особенностью микроплазменной сварки на постоянном токе является то, что катодная область дуги находится в атмосфере плазмообразующего газа (аргона), а столб дуги и анодная область – в атмосфере защитного газа. Еще одной особенностью микроплазменной сварки является то, что регулируемость параметров сжатой дуги в широких пределах обуславливает многообразие технологических приемов плазменной сварки. Микроплазменная свар-

ка успешно применяется для наплавки изделий из особо тонких металлов и сплавов, таких как мембраны, миниатюрные трубопроводы, полупроводниковые приборы, конденсаторы, узлы электронных ламп [2].

При работе на прямой полярности (рис. 1, *а*) изделие является анодом, а как известно, анодные процессы сопровождаются повышенным выделением тепла. Это приводит к глубокому проплавлению основного материала и повышению доли участия его в наплавленном слое. При наплавке на обратной полярности (рис. 1, *б*) изделие является катодом. Процесс блуждания нестационарных катодных пятен по поверхности изделия приводит к резкому нагреву, расплавлению и испарению металла в очень тонком поверхностном слое. В результате катодного эффекта происходит очистка поверхности основного металла от окислов и загрязнений, улучшается смачивание наплавленной поверхности жидкого металла и повышается качество сплавления металла.

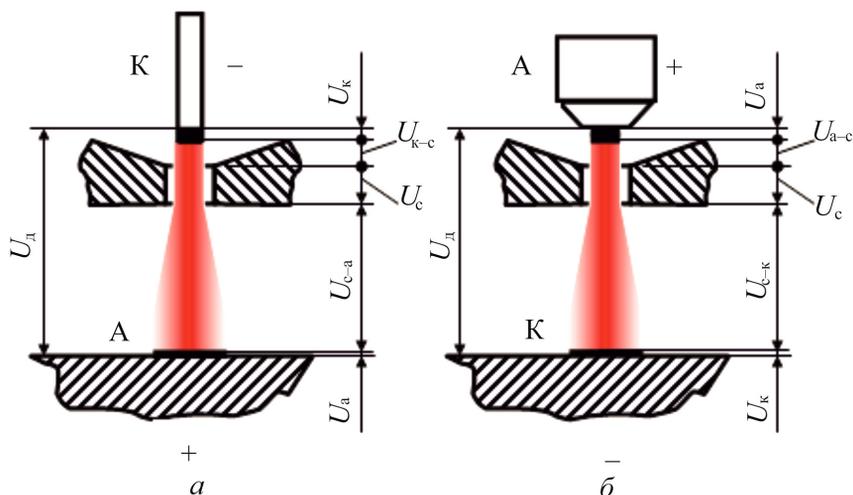


Рис. 1. Структурная модель плазменной дуги прямого действия: *а* – прямая полярность; *б* – обратная полярность; К – катод; А – анод;  $U_d$  – напряжение дуги, В;  $U_a$  – напряжение на аноде, В;  $U_k$  – напряжение на катоде, В;  $U_c$  – напряжение на плазмообразующем сопле, В;  $U_{k-c}$  – напряжение на участке катод – сопло, В;  $U_{a-c}$  – напряжение на участке анод – сопло, В;  $U_{c-a}$  – напряжение на участке сопло – анод, В;  $U_{c-k}$  – напряжение на участке сопло – катод, В

Были собраны литературные данные по существующим способам наплавки меди, по результатам литературных данных была проведена плазменная наплавка меди на сталь при работе плазматрона на токах прямой и обратной полярности. Проведенные исследования на разработанном оборудовании позволяют выделить наиболее благоприятные режимы плазменной наплавки.

Режим наплавки на прямой полярности:

$I_d, A$	$d_{п.с}, мм$	$V_{п.п}, м/мин$	$V_{св}, м/ч$
180	5	1,8	7,2

Режим наплавки на обратной полярности:

$I_d, A$	$d_{п.с}, мм$	$V_{п.п}, м/мин$	$V_{св}, м/ч$
160	5	2	7,2

Микроструктурные исследования наплавленных образцов показали, что при наплавке на токе прямой полярности заметно проплавление основного материала, наблюдается растворение меди в основном материале и вкраплений основного материала в наплавленном слое. Размер зоны структурных превращений вследствие нагрева составляет 0,5 мм (рис. 2). При использовании тока обратной полярности наблюдается четкая граница сплавления, практически отсутствует переходная зона (составляет 0,05 мм). Заметно резкое снижение доли участия основного металла в наплавленном слое (рис. 3). В микроструктурах при автоматической сварке под флюсом и электродуговой сварке наблюдается высокая доля включений основного материала в наплавленный слой (рис. 4, 5).



Рис. 2. Микроструктура наплавленного слоя на токе прямой полярности.  $\times 200$



Рис. 3. Микроструктура наплавленного слоя на токе обратной полярности.  $\times 200$

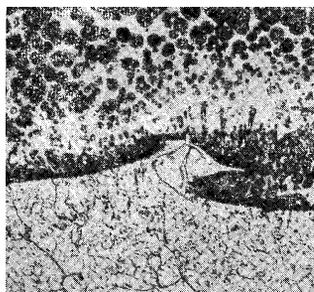


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя автоматической наплавкой под флюсом.  $\times 200$

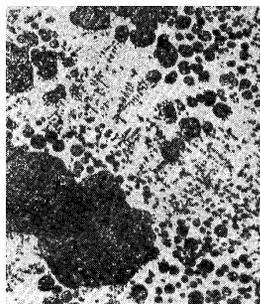


Рис. 5. Микроструктура наплавленного слоя электродуговой наплавкой покрытыми электродами.  $\times 200$

При плазменной наплавке меди четко видна граница сплавления основного металла с наплавленным, меньшая переходная зона, включений основного металла в наплавленный слой не наблюдается, металл наплавки получается без дефектов, нет пор, усадочных раковин, наблюдается относительно высокая плотность.

Сделаем выводы:

– плазменная наплавка обеспечивает минимальное проплавление основного металла и позволяет снизить долю участия основного металла в наплавленном слое;

– при использовании этого метода обеспечивается высокая концентрация тепловой энергии в плазменной дуге, широкий диапазон регулирования параметров режима наплавки, высокое качество сплавления основного металла с наплавленным;

– при этом не наблюдается включений основного металла в наплавленный слой, наплавленные слои получаются без дефектов, пор, усадочных раковин.

Таким образом, с технологической и экономической точки зрения применение технологии наплавки плазменной дугой целесообразно.

### **Список литературы**

1. Псарас Г.Г., Ежель А.И. Сварщику цветных металлов: справ. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Донбас, 1985. – 174 с.

2. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов / под ред. В.Н. Замкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова думка, 1990. – 512 с.

3. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве. Ч. 1: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – 73 с.

4. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.

5. Плазменная наплавка металлов / А.Е. Вайнерман [и др.]. – М.: Машиностроение, 1969. – 192 с.

Получено 23.04.2014

**Гилев Иван Александрович** – магистрант, ПНИПУ, гр. ЛТС-13м, e-mail: navokain@mail.ru.

**Белинин Дмитрий Сергеевич** – ассистент, ПНИПУ, e-mail: 5ly87@mail.ru.

**Кучев Павел Сергеевич** – ассистент, ПНИПУ, e-mail: kучев.p@gmail.com.

**Неулыбин Сергей Дмитриевич** – магистрант, ПНИПУ, гр. ТСП-12м, e-mail: sn-1991@mail.ru.