



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАПЛАВКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

И. А. БАРТЕНЕВ, канд. техн. наук (Карагандинский гос. техн. ун-т, Казахстан)

Проведен анализ и обобщение параметров технологических операций наплавки сплавов черных и цветных металлов с высоким содержанием легирующих элементов. Показано, что необходимое минимальное перемешивание основного металла с высоколегированным наплавленным достигается только при их раздельном плавлении. Наиболее перспективными технологиями наплавки таких сплавов являются плазменная наплавка порошками и гибридные технологии.

Ключевые слова: наплавка, высоколегированный сплав, технологические особенности, плавление присадочного металла, нагрев основного металла, проплавление основного металла

Наплавка как технологический процесс восстановления размеров деталей и исправления дефектов отливок известна с конца XIX в. [1]. Однако более рациональной является упрочняющая наплавка, которая обеспечивает повышение стойкости деталей во много раз по сравнению с изготовлением их из конструкционных металлов. Для наплавки используют высоколегированные стали и сплавы железа и цветных металлов со специальными служебными свойствами, которые можно разделить на следующие группы [2, 3]:

- хромистые стали (5...30 % Cr);
- высокомарганцевые стали (11...18 % Mn);
- быстрорежущие стали (2...20 % W, 2...10 % Mo, 5...15 % Co, 3...5 % Cr);
- хромоникелевые аустенитные стали (12...20 % Cr, 8...25 % Ni);
- высокохромистые чугуны (2...5 % C, 18...35 % Cr);
- никелевые сплавы (15...21 % Cr, 2...5 % Si, 3...30 % Mo, до 15 % Co);
- кобальтовые сплавы (25...33 % Cr, 3...25 % W, до 3 % C);
- медные сплавы (бронзы, латуни); карбидные композиции (до 3 % C, 25...33 % Cr, 30...70 % Co, 3...25 % W).

Наибольшую трудность представляет наплавка сплавов, так как требуются технологии, режимы и материалы, отличающиеся от широко распространенных в сварочном производстве. Это вызвано повышенной склонностью к образованию трещин при наплавке высоколегированных сплавов, необходимостью достаточно точного воспроизведения требуемого химического состава наплавленного металла, высокой чувствительностью к образованию пор, повышенной окисляемостью легирующих элементов, ликвацией. Ши-

роко применяемые способы дуговой наплавки особенно сплавов цветных металлов, обычно не обеспечивают требуемое качество и выполняются в три-четыре слоя для получения необходимого химического состава и припуска на механическую обработку. Для предотвращения негативного влияния этих факторов при наплавке высоколегированных сплавов разработаны и применяются следующие технологические меры:

- тщательная подготовка поверхности деталей под наплавку;
- технологии наплавки, обеспечивающие минимальное проплавление основного металла;
- надежная защита сварочной ванны от воздействия кислорода и водорода;
- предварительный подогрев и замедленное охлаждение после наплавки;
- воздействие на первичную структуру наплавленного металла;
- термическая обработка после наплавки;
- нанесение промежуточного подслоя.

Перед наплавкой высоколегированных сплавов, особенно из цветных металлов, поверхность деталей должна быть очищена от оксидных пленок и жировых загрязнений. Для этого проводится механическая обработка металлорежущим инструментом (резцы, фрезы, шлифовальные круги) с последующим обезжириванием органическими растворителями или обработка химически активными флюсами. Такая очистка способствует лучшему растеканию и смачиванию поверхности наплаваемой детали жидким присадочным металлом. Особенно это важно при наплавке с минимальным или нулевым проплавлением поверхности, когда процесс по физической сущности приближается к процессу пайки.

Выбор технологий наплавки в большинстве случаев обусловлен необходимостью обеспечения точного содержания легирующих элементов в наплавленном металле, от которого зависят служебные свойства деталей. Проплавление основного металла и его перемешивание с наплавлен-

ным должно быть близким к нулю. Этому условию удовлетворяют следующие способы наплавки: плазменная; индукционная наплавка заливкой жидкого присадочного металла; электрошлаковая двумя электродными лентами или с применением специальных активирующих флюсов; гибридные технологии наплавки.

Общим физическим и технологическим признаком этих процессов является разделение плавления присадочного металла и подогрева основного металла.

В начале 1940-х годов разработана наплавка жидким присадочным металлом [4], при которой расплавленный, например, в индукционной печи или электротигле, металл выливается на поверхность детали, подогреваемой слаботоковым дуговым разрядом. При минимальном проплавлении детали производительность достигается высокой, но при этом требуется дополнительное электрооборудование. Этот способ нашел ограниченное применение для наплавки небольших деталей легкоплавкими сплавами, например, баббитами для вкладышей и втулок подшипников скольжения. В современных условиях эта технология находит применение как центробежная заливка или наплавка, а также как наплавка намораживанием с использованием боридных флюсов для очистки поверхности детали от оксидных пленок и активации ее [3].

Плазменная наплавка с присадкой порошка значительно отличается от других способов наплавки по типу применяемого оборудования, материалам и технологическим возможностям [5]. Основными ее преимуществами являются высокое качество формирования и получение требуемого химического состава наплавленного металла уже в первом слое; минимальное проплавление и термическое воздействие на основной металл; мелкозернистая структура наплавленного металла; возможность наплавки сплава любого состава при использовании присадочного порошка, полученного распылением жидкого металла; надежная защита капель металла и сварочной ванны инертным газом.

На процессы взаимодействия жидкого присадочного металла с твердым основным металлом влияют температура в зоне наплавки и химический состав металлов. Глубина проплавления уменьшается при использовании присадочных материалов с более низкой, чем у изделия, температурой плавления. При большей разнице температур можно получить меньшую глубину проплавления. Существенно улучшить растекание жидкого присадочного материала и смачивание поверхности наплаваемой детали без ее оплавления можно, добавив поверхностно-активные вещества, например, бор и кремний в сплавы на основе кобальта, никеля, хрома.

Установлено, что температура плавления дисперсных порошковых сплавов ниже температуры плавления массивных образцов [6]. Понижение температуры плавления порошка ΔT по сравнению с температурой плавления T сплошного (массивного) образца можно определить по формуле

$$\Delta T = 2T(\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}) / [\sigma_{1,3} - (\sigma_{2,3} + \sigma_{1,2})d],$$

где $\sigma_{1,3}$, $\sigma_{1,2}$ — соответственно коэффициент поверхностного натяжения твердого металла и расплава; $\sigma_{2,3}$ — коэффициент межфазного натяжения на границе «твердый металл–расплав»; d — диаметр (размер) частицы порошка.

Следовательно, применение порошков требует меньшего тепловложения в присадочный и основной металл, чем наплавочные проволоки и ленты сплошного сечения, что приводит к меньшему перегреву и расплавлению поверхности детали.

Нагрев и расплавление основного металла тепловой сжатой дуги оценивается эффективным КПД, который при плазменной наплавке $\eta_{\text{и}} = 0,68 \dots 0,72$. На нагрев и расплавление зоны проплавления затрачивается только часть эффективной мощности, которая оценивается термическим КПД, значения которого определены экспериментально [7] ($\eta_{\text{т}} = 0,32 \dots 0,34$). Площадь проплавления можно определить из формулы

$$\eta_{\text{т}} = S_{\text{пр}} v_{\text{р.н}} \rho H_{\text{пл}} / (IU \eta_{\text{и}}),$$

где $S_{\text{пр}}$ — площадь проплавления, см², равная Bh ; B — ширина зоны проплавления, см; h — глубина проплавления, см; $v_{\text{р.н}}$ — результирующая скорость наплавки, см/с; $IU \eta_{\text{и}}$ — эффективная мощность сжатой дуги, Вт, равная $q_{\text{и}}$; ρ — плотность металла, г/см³; $H_{\text{пл}}$ — удельная энтальпия расплавленного металла, включая скрытую теплоту плавления, Дж/моль.

Наибольшее количество частиц металлического порошка, подаваемого через сжатую дугу, попадает в сварочную ванну в виде капель. Наиболее крупные фракции порошка плавятся уже в сварочной ванне, но при определенных режимах наплавки и соотношениях размеров (массы) частиц мелких и крупных фракций они становятся дополнительными центрами кристаллизации или «микрохолодильниками». Эта особенность данной технологии приводит к измельчению литой микроструктуры и повышению механических свойств наплавленного металла (рис. 1). Наблюдается также структурная наследственность в системе «наплавочный порошок–сварочная ванна–наплавленный металл» [8].

При плазменно-порошковой наплавке достигается минимально достаточное значение проплавления поверхности детали (не более 0,5...1,0 мм) при доле основного металла в наплавленном γ_0 в пре-

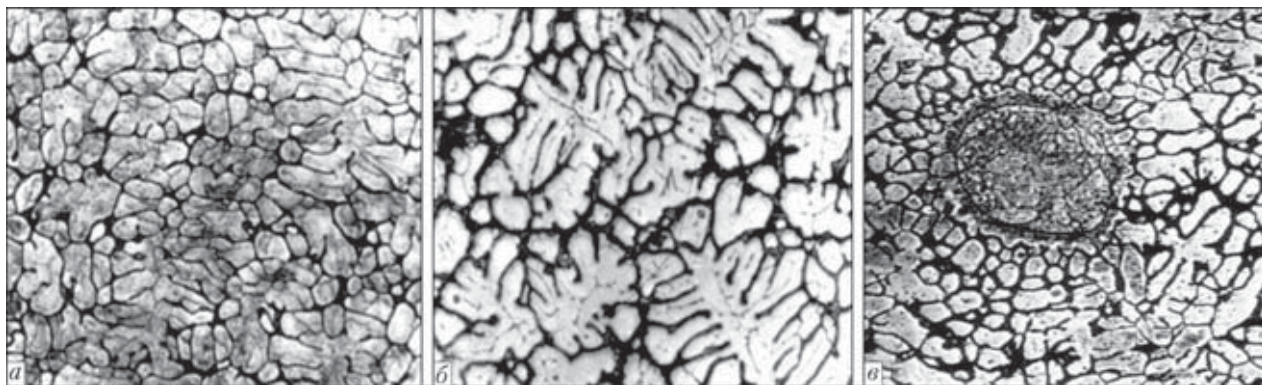


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 400$) наплавленной быстрорежущей стали 10P6M5 при введении порошка крупных фракций в присадочный порошок мелких фракций: *а, б* — наплавка смесью с добавлением соответственно 30 и 45 % крупных фракций; *в* — нерасплавившаяся частица порошка (в центре) при добавлении крупных фракций

делах 2...8 %. Более того, при наплавке самофлюсующихся никель-хромовых сплавов типа Колоной, содержащих 2...5 % бора и 2...5 % кремния и имеющих температуру плавления ниже, чем у стали, образование соединения наплавленного металла с основным может происходить по типу паяного, т. е. практически без оплавления поверхности основного металла. Многочисленные испытания и работа в производственных условиях деталей запорной арматуры высоких параметров, металлорежущих инструментов (концевые фрезы, метчики, дисковые ножи, резцы), деталей экструдеров, пуансонов и других изделий, наплавленных с помощью плазменно-порошковой технологии, показали высокую прочность сцепления наплавленного металла с основным.

На величину γ_0 при плазменно-порошковой наплавке, как и при всех способах дуговой наплавки, наибольшее влияние оказывает сила тока дуги прямого действия. Особенно это заметно при небольшой толщине наплаваемого слоя. С увеличением массовой скорости подачи порошка и толщины слоя расширяется диапазон токов, при которых γ_0 находится в пределах 2...10 %, что объясняется уменьшением прямого воздействия дуги на основной металл.

На проплавление основного металла значительно влияет увеличение расхода плазмообразующего газа. Это связано со степенью сжатия дуги и соответственно возрастанием давления плазмы дуги на металл сварочной ванны и проплавающей способности. Аналогично, но в меньшей степени влияет расход транспортирующего газа. В качестве плазмообразующего, защитного и транспортирующего газов при этой технологии применяется аргон.

В отличие от традиционных методов дуговой наплавки при плазменно-порошковой не происходит изменения проплавления с уменьшением или увеличением расстояния от плазмотрона до изделия (длины дуги). Устойчивость дуги прямого действия сохраняется, но при расстоянии до из-

делия более 15 мм возрастают потери порошка и ухудшается защита наплаваемого металла.

Массовая скорость подачи порошка связана с силой тока дуги и скоростью наплавки. При одновременном увеличении этих трех параметров режима возрастает проплавление. Рекомендуется скорость наплавки определять по следующей формуле [5]:

$$v_n = G_n / \rho \mu B H,$$

где G_n — массовая скорость подачи порошка, г/с; μ — коэффициент полноты валика при плазменно-порошковой наплавке, равный 0,8...0,85; B , H — ширина и высота наплавленного валика, см.

Применяемые для плазменной порошковой наплавки гранулированные порошки черных и цветных металлов отличаются большим разнообразием составов и могут быть изготовлены распылением практически из любого сплава, прежде всего сплавами на основе железа, никеля, меди и кобальта. Вследствие технологических особенностей плазменно-порошковой наплавки состав наплавленного металла в первом слое соответствует химическому составу присадочного порошка. При отличном формировании наплавленных валиков в большинстве случаев это позволяет ограничиться однослойной наплавкой и значительно уменьшить припуски на последующую механическую обработку наплавленной детали.

Флюсы для высокотемпературной пайки и сплавы с температурой плавления ниже, чем у конструкционных сталей, применяют в виде шихты при индукционной наплавке [9]. При нагреве в высокочастотном поле сначала плавится флюс, содержащий буру, борный ангидрид и силикокальций, который очищает поверхность детали от оксидной пленки, а затем плавится и растекается по активированной поверхности присадочный материал. Процесс индукционной наплавки проходит в этом случае как при пайке, а разница в температурах плавления исключает возможность перемешивания основного металла с наплавлен-

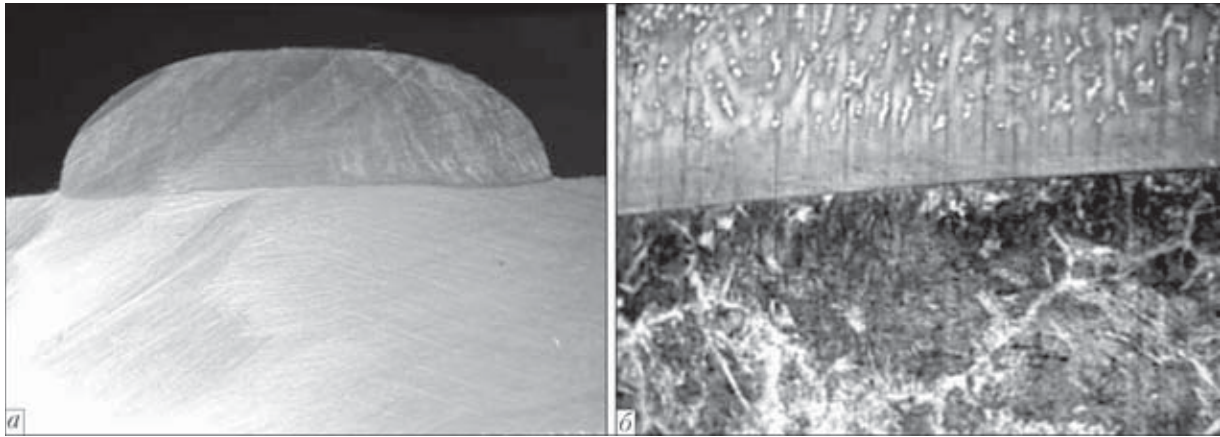


Рис. 2. Макрошлиф наплавленного образца (а) и микроструктура ($\times 400$) (б) высокомарганцевой стали (сверху), наплавленной на Ст3 с применением комбинированного присадочного материала

ным высоколегированным сплавом типа Сормайт. Изготовленные по этой технологии лемехи плугов успешно работают в условиях интенсивного абразивного износа.

Технология горизонтальной электрошлаковой наплавки двумя лентами, разработанная австрийской фирмой «Бёллер» и ИЭС им. Е. О. Патона, применяется для изготовления биметаллических пластин (низкоуглеродистая сталь + нержавеющая сталь) [10]. Устойчивый электрошлаковый процесс протекает при использовании фторидных низкокремнистых флюсов типа АН-26П и 48-ОФ-10, а зеркало ванны поднимается в зазоре между лентами на 20...30 мм над поверхностью основного металла. Это позволяет снизить долю основного металла в наплавленном до 5...8 %. Еще меньшее значение γ_0 можно получить при электрошлаковой наплавке меди на сталь с применением фторидных и боридных флюсов, содержащих CaF_2 , NaF , KF , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, V_2O_5 , которые активируют поверхность детали и расплавляют присадочный металл [11]. При этом предотвращается появление трещин в стали на границе сплавления и расклинивающее действие жидкой меди, проникающей в эти трещины (эффект Ребиндера), которое имеет место при обычной электродуговой наплавке со значительным проплавлением. При этом процессе применяют пластинчатые электроды и плавящиеся мундштуки в вертикальном положении при температурах ниже температуры плавления низкоуглеродистой стали (1200...1350 °С).

Межзеренные трещины в основном металле, распространяющиеся обычно перпендикулярно границе сплавления, могут образоваться при наплавке медных сплавов на ряд сталей. Применение подслоя из хромоникелевой ферритно-аустенитной стали с содержанием в структуре не менее 40 % ферритной фазы полностью исключает возникновение подобных трещин при последующей наплавке на такой подслое сплавов на медной основе. Иногда необходимость подслоя может вызываться и другими причинами. Например, при эк-

сплуатации наплавленной детали в условиях термочастотных нагрузок из-за различий коэффициентов линейного расширения основного и наплавленного металлов возникают большие термические напряжения, вызывающие разрушения в результате термической усталости после воздействия определенного количества циклов.

К этой группе технологий можно отнести также разрабатываемый в КарГТУ способ наплавки с применением комбинированного присадочного материала. Незначительное проплавление поверхности наблюдается только по краям наплавленного валика шириной 23 мм и высотой 6,5 мм (рис. 2, а) при четкой границе сплавления в средней части сечения валика. Твердость наплавленного металла (высокоуглеродистая марганцевая сталь) в первом слое составляет $HRC\ 44...52$. В микроструктуре наблюдаются весьма мелкие дендриты, растущие от поверхности основного металла, с большим содержанием аустенита и мартенсита (рис. 2, б).

После наплавки высоколегированных сплавов в большинстве случаев проводится термообработка в виде отпуска. Для никель-хромовых сплавов типа НХ15СР2 это высокий отпуск при температурах 600...700 °С в течение 3...24 ч для перераспределения внутренних напряжений в соединении разнородных сплавов. Сокращенную термообработку в виде двух-, трехкратного отпуска при 560 °С применяют для быстрорежущих сталей после плазменно-порошковой наплавки металлорежущего инструмента простой формы (дисковые ножи, резцы). Отпуск не только снижает внутренние напряжения в быстрорежущей стали, закаливающейся на воздухе в процессе наплавки, но и повышает вторичную твердость до $HRC\ 63...64$ для вольфрамомолибденовых сталей и до $HRC\ 66...67$ для кобальтовых сталей. При наплавке заготовок многолезвийного инструмента термообработка быстрорежущих сталей проводится по полному циклу для таких сталей: отжиг + закалка + отпуск.

**Выводы**

1. Наплавка высоколегированных сплавов с минимальным проплавлением основного металла технологически осуществима и экономически оправдана.

2. Для получения минимального перемешивания основного и наплавленного металлов необходимо раздельное плавление присадочного и нагрев основного металла.

3. Для высоколегированных сплавов наиболее предпочтительна плазменно-порошковая наплавка, позволяющая легко регулировать проплавление и наплавлять широкий спектр химических составов сплавов на основе железа и цветных металлов с помощью порошков, полученных распылением жидкого металла.

4. Для снижения остаточных напряжений в высоколегированном наплавленном металле наиболее часто применяется отпуск.

1. *Научно-технические изобретения и проекты // Избр. тр. Н. Н. Бенардос.* — Киев: Наук. думка, 1982. — С. 239.
2. *Фруммин И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. — Харьков: Металлургиздат, 1961. — 421 с.

Parameters of the technological operations in deposition of alloys of ferrous and non-ferrous metals with a high content of alloying elements is analysed and generalised. It is shown that the required minimal dilution of the base metal with the high-alloyed deposited one can be achieved only in their separate melting. The most promising technologies for deposition of such alloys are plasma powder cladding and hybrid technologies.

3. *Рябцев И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов. — Киев: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
4. *Никитин В. П.* Изыскания новых способов повышения производительности и качества сварки, основанных на принципе раздельного регулирования // Проблемы дуговой и контактной электросварки. — Киев: Машгиз, 1956. — С. 234–235.
5. *Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А.* Плазменная наплавка. — Киев: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
6. *Пацкевич И. Р., Деев Г. Ф.* Поверхностные явления в сварочных процессах. — М.: Металлургия, 1974. — 120 с.
7. *Сидоров А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. — М.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
8. *Влияние исходной структуры и гранулометрического состава порошка на структуру металла 10P6M5, наплавленного плазменно-порошковым способом / И. А. Рябцев, Е. Ф. Переплетчиков, И. В. Миц, И. А. Бартнев // Автомат. сварка.* — 2007. — № 10. — С. 23–27.
9. *Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, Н. В. Казинцев, Д. А. Алдырев.* — М.: Машиностроение, 1970. — 183 с.
10. *Разработка процесса и исследование некоторых технологических особенностей электрошлаковой наплавки лентами / И. И. Фруммин, В. К. Каленский, Ю. А. Панчин и др. // Теоретические и технологические основы наплавки.* — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1977. — С. 83–89.
11. *Лычко И. И.* Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь. — Киев: УкрНИИТИ, 1969. — 14 с.

Поступила в редакцию 27.01.2011



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПОДГОТОВКА КАДРОВ»

6–8 сентября 2011

г. Мариуполь

Организатор:

Министерство образования и науки Украины
Общество сварщиков Украины
Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»
Приазовский государственный технический университет
Сварочный факультет ПГТУ ОАО «Азовмаш» (г. Мариуполь)

Программа конференции

На конференции планируются пленарные и секционные заседания по следующим направлениям:

- повышение качества и эффективности процессов сварки и других родственных технологий;
- проблемы проектирования, изготовления и эксплуатации сварных конструкций;
- система сертификации продукции сварочного производства;
- совершенствование подготовки кадров в условиях многоуровневой системы высшего образования.

Справки по телефонам: 44-65-91, 44-65-79, 44-61-79, 44-64-13.