

Кудина А.В., Соколов И.О.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ
МЕТАЛЛОПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ
С ПОРОШКОВОЙ ПРИСАДКОЙ**

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

В статье изложены некоторые технологические особенности электродуговой наплавки металлоповерхностей с легирующей металлопорошковой присадкой. Приводятся уравнения и формулы для расчёта показателей установленных технологических особенностей, которые необходимо учитывать для получения высококачественных защитно-упрочняющих металлоповерхностей на деталях машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного изнашивания.

Среди многочисленных способов восстановления и упрочнения деталей машин среднего и тяжёлого машиностроения для получения качественных металлоповерхностей деталей узлов трения с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками применение электродуговой наплавки наиболее целесообразно. Это объясняется тем, что такие технологии позволяют существенно снизить металлоёмкость ремонтного и изготовительного производства, формировать рабочие трибоповерхности деталей машин с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, что способствует увеличению их ресурса, надёжности и долговечности сборочных единиц и, следовательно, машин и технологического оборудования в целом. Электродуговая наплавка металлопокрытий плавящимся электродом в среде защитного газа является наиболее простым, универсальным, экономичным и применяемым широко способом для восстановления изношенных трибоповерхностей деталей машин и механизмов. Этот метод позволяет придать восстановленным рабочим поверхностям деталей новые специальные свойства и качество, способствующие поднять на порядок эксплуатационные характеристики узлов трения сборочных единиц машин и агрегатов. Требуемые свойства наплавленных покрытий обычно получают легированием, то есть введением в его состав легирующих примесей. Методы легирования и способы наплавки взаимосвязаны – выбранный способ наплавки, как правило, диктует рациональный метод легирования и, наоборот, эффективный метод легирования требует применения соответствующего способа наплавки. Анализ результатов исследований и статистических данных о работе большинства деталей машин отечественного и зарубежного производства, работающих в условиях трения и интенсивного износа, однозначно указывает на то, что для трибоповерхностей этой категории деталей требуются прочные и износостойкие металлопокрытия с повышенным содержанием легирующих износостойких химических элементов. Такие металлопокрытия легко наносятся методами электродуговой наплавки или напыления, которые не сложны в технологическом оснащении, и не требуют значительных экономических и производственных затрат. Нанесенные электродуговой наплавкой упрочняющие металлопокрытия, обладают высокими (заданными) физико-механическими и эксплуатационными свойствами, более долговечны и надёжны для работы при больших удельных нагрузках в узлах трения, что позволяет обеспечить высокое качество и надёжность составляющих элементов сборочных единиц как машин, так и технологического оборудования в целом. Однако, не смотря на отмечаемые преимущества наплавленных металлоповерхностей они, ино-

гда, при несоблюдении технологических требований или грубых нарушениях режимов электродуговой наплавки, могут приобретать металлургические дефекты, которые практически отсутствуют при правильном и безукоризненном выполнении технологии нанесения металлоповерхностей этим методом.

Основная часть. При электродуговой наплавке металлоповерхностей сплошным проволочным электродом в среде защитного газа с введением порошкового легирующего материала, химический состав наплавленного металла определяется концентрацией легирующих элементов в основном металле детали, электродной проволоке и порошковой присадке. В композиционном слое металл основы и металл проволоки образуют матричный сплав, в который вплавлены твердосплавные частицы присадки. При наплавке гомогенного покрытия все три составные части перемешиваются, образуя при кристаллизации монолитный слой [1], а необходимые физико-механические свойства покрытий обеспечиваются за счёт легирующих присадочных материалов, вводимых в расплав сварочной ванны. В отечественной металлургии и сварочном производстве широко применяется легирование расплава металла, то есть технология обработки жидкого металла металлопорошковыми сплавами или металлическими добавками (присадками), обеспечивающая создание развитой контактной поверхности расширяющих фаз и активизацию реакций на границе раздела твёрдая фаза – жидкий металл, чем ускоряются процессы диффузии в расплаве металла, интенсифицируется его раскисление и легирование. Причём, при электродуговой наплавке в среде защитного газа, подача порошкового присадочного материала в зону сварочной ванны осуществляется в большинстве случаев газовой струёй внутрь факела защитного газа. Однако, технология применения металлопорошковых смесей из сплавов для легирования наплавленной металлоповерхности и активирования процессов электродуговой наплавки имеет ряд особенностей, некоторые из которых выявлены на основе анализа результатов, полученных при выполнении научно-исследовательских работ и экспериментов и которые влияют на качество наплавленных слоёв [1–4]:

1. Объём жидкого металла в сварочной ванне, как правило, не превышает $1,0 - 2,0 \text{ см}^3$, а его масса – 10 г. Из-за этого практически невозможна полная продувка порошковой смеси через расплав металла, поэтому единственным реальным методом ввода легирующей присадки является её вдувание на поверхность сварочной ванны. При таком методе ввода присадочного металлопорошка трудно обеспечить проникновение легирующих частиц на необходимую глубину, что иногда приводит к неравномерности легирования покрытия по высоте, которая, в определённой степени, может повлиять на параметр износостойкости наплавленного слоя. Кроме того, отсутствие чёткой зависимости глубины проплавления основного металла при наплавке от количества металлопорошка, подаваемого в сварочную ванну, не всегда позволяет получать слои покрытий с заданными физико-механическими характеристиками. Экспериментально показано [1], что при увеличении количества порошка, подаваемого в расплав сварочной ванны, глубина проплавления основного металла уменьшается. Так при наплавке поверхностей электродной проволокой СВ-08Г2С ГОСТ 2246-70 глубина проплавления основного металла составила 1,4 мм, в то время как при наплавке этой же проволокой и при тех же режимах наплавки с подачей металлопорошка в расплав сварочной ванны, глубина проплавления основного металла снижалась до 0,6мм. Однако, увеличение количества подаваемого в сварочную ванну порошка оказывает влияние на формирование покрытия до определенных величин, при достижении которых избыток порошка, не успевая раствориться, сдувается дугой и защитным газом, что приводит к непредвиденным потерям дорогостоящей лигатуры. Поэтому, важным моментом при формировании наплавленного покрытия является количество вводимого в зону наплавки порошкового присадочного материала (ППМ) в единицу времени. Исходя из того, что тепловая эффективность процесса наплавки оценивается тепловыми коэффициентами полезного

действия процессов наплавки и проплавления, количество вводимого ППМ рассчитывается по зависимости [1]:

$$G_g = \frac{\Delta_p Q}{(C_{nl} T_{nl} + \mu - C_n T_n)} = \frac{v_n \rho_m S_{nl} (F_n - F_{np})}{(C_{nl} T_{nl} + \mu - C_n T_n)}, \quad (1)$$

где G_g – количество вводимого ППМ, г;

Δ_p – масса расплава, г;

Q – затраченная тепловая мощность на расплавление, Вт;

C_{nl} – теплоемкость ППМ при температуре плавления, Дж/К;

T_{nl} – температура плавления ППМ, К;

μ – скрытая теплота плавления ППМ, Дж;

C_n – теплоемкость ППМ при начальной температуре, Дж/К;

T_n – начальная температура ППМ, К;

v_n – скорость наплавки, см/с;

ρ_m – удельная плотность металла, г/см³;

S_{nl} – теплосодержание с учетом скрытой теплоты плавления, Дж;

F_{np} – площадь поперечного сечения зоны проплавления металла, см²;

F_n – площадь поперечного сечения наплавленного металла, см².

2. Важным условием получения качественного покрытия является расчёт параметров зоны ввода газопорошковой смеси в расплав сварочной ванны. При формировании покрытий с использованием газопорошковой струи, из-за небольшого размера площади жидкого металла сварочной ванны, имеет значение величина зоны и место ввода порошковой присадки [2]. Если ширина струи будет превышать ширину жидкого металла, то это приведет к потерям порошка. Место ввода определяется той частью слоя, которая имеет оптимальную температуру и конвективные потоки в которой обеспечивают равномерность физико-механических свойств покрытия. При расчёте параметров газопорошковой струи и размеров области ввода ППМ, считают газовую струю турбулентной, так как значения числа Рейнольдса выше критических скоростей струи, транспортирующей порошковую присадку. Влиянием частиц на параметры струи пренебрегают из-за их малого процентного содержания в общем объеме газа.

Для определения длины зоны ввода ППМ (размер по оси параллельной направлению наплавки) на начальном участке струи L_n , где границы струи имеют прямолинейный характер, получена формула, вытекающая из геометрических построений (см. рис. 1):

$$L_g = 0,99(0,5d_c + 0,14x) \left[\sin^{-1}(\alpha + \Theta_n) + \sin^{-1}(\alpha - \Theta_n) \right], \quad (2)$$

где d_c – диаметр выходного отверстия сопла, мм;

x – расстояние от среза сопла до поверхности ванны жидкого металла, мм;

α – угол между осью струи и поверхностью жидкого металла, град.;

Θ_n – угол бокового расширения струи на начальном участке, град.;

Полученная зависимость (2) справедлива при расстоянии от сопла до получаемого слоя не более длины начального участка струи, которая для осесимметричной струи

составляет 6,2 диаметра выходного отверстия сопла, при этом $\Theta_H = 8^{\circ}35'$. При расстоянии x , превышающем длину начального участка, зависимость (2) будет неверна из-за того, что струя имеет криволинейные границы на основном участке. Длину зоны ввода порошка в этом случае можно определить аналогично тому, как она находилась на начальном участке струи по зависимости (3):

$$L_g = 0.215x \left[\sin^{-1}(\alpha + \Theta_0) + \sin^{-1}(\alpha - \Theta_0) \right] \quad (3)$$

Здесь $\Theta_0 = 12^{\circ}15'$ – угол бокового расширения, но уже основного участка струи.

Ширина зоны ввода (размер по оси перпендикулярной направлению наплавки) рассчитывается по формуле (4), при $\alpha=90^{\circ}$. Зависимость соотношения длины и ширины зоны ввода порошка от угла между осью струи и поверхностью для основного участка струи показана на рис. 1.

$$B = 2L_B \sin^{-1} \alpha \operatorname{tg} \Theta_0 \left[\operatorname{ctg}(\alpha - \Theta_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_0) \right]^{-1} \quad (4)$$

При заданной длине зоны ввода ППМ и положения оси сопла в пространстве (L_C – длина зоны ввода порошка, H_C – высота над уровнем металла) можно рассчитать по формулам 5 и 6:

$$H_C = L_B \left[\operatorname{ctg}(\alpha - \Theta_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_0) \right]^{-1} \quad (5)$$

$$L_C = L_B \operatorname{ctg}(\alpha - \Theta_0) \left[\operatorname{ctg}(\alpha - \Theta_0) - \operatorname{ctg}(\alpha + \Theta_0) \right]^{-1} \quad (6)$$

Следует помнить, что размеры зоны ввода присадочного материала не должны быть больше размеров зеркала сварочной ванны. В противном случае возрастают потери дорогостоящего присадочного материала, подаваемого газопорошковой струей в зону наплавки.

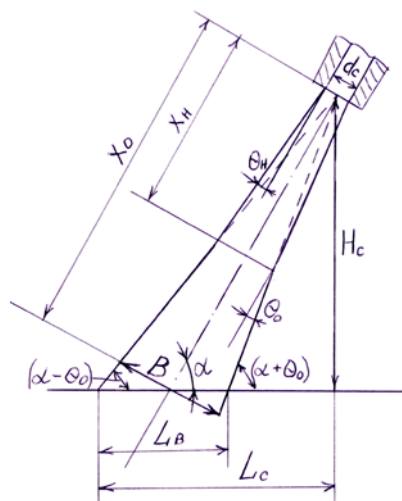


Рис. 1. Схема определения размеров зоны ввода ППМ:

α – угол между осью струи и поверхностью жидкого металла, град;

Θ_0 – угол бокового расширения струи на начальном участке; d_c – диаметр выходного отверстия сопла, мм; X_0 – расстояние от среза сопла до поверхности жидкого металла, мм; L_B – длина зоны ввода порошка, мм; H_C – высота над уровнем металла, мм; B – ширина зоны ввода, мм; L_C – длина участка струи, мм

3. Существенное значение для получения качественных легированных металлоповерхностей электродуговой наплавкой с порошковой присадкой имеет скорость подачи последней в расплав сварочной ванны [1, 2]. Это связано с тем, что высокоскоростная струя может нарушить формирование наружной поверхности покрытия, вызвать седлообразность наплавленных валиков, наплывы, выплескивание жидкого металла из ванны. Струя с малой скоростью не обеспечивает проникновения легирующих частиц с небольшой плотностью на необходимую глубину, а это приводит к неравномерности легирования покрытия по высоте. Как показали экспериментальные исследования, скорость введения металлопорошковой присадки в расплав сварочной ванны зависит от технологических режимов наплавки и устанавливается опытным путём. Многочисленные эксперименты и анализ полученных результатов показали, что при электродуговой наплавке в среде защитного (углекислого) газа проволокой Св-08Г2С с введением в расплав металла сварочной ванны твердосплавного порошка фракции до 500 мкм со скоростью 0,4...2,3 г/с (при скорости наплавки 9,8 м/ч, расходе углекислого газа 9...10 л/мин силе тока $I_a = 180...200$ А, напряжении наплавки $U = 23...26$ В), выбранные режимы являются оптимальными. Увеличение мощности дуги приводит к потерям легирующей присадки и образованию крупнозернистой структуры, что отрицательно сказывается на физико-механических характеристиках наплавленного валика. При мощности дуги ниже оптимальной частицы металлопорошка, недостаточно расплавляясь, образуют неоднородную структуру, что приводит к снижению износостойкости полученного слоя. Так, например, включение при электродуговой наплавке поверхностей в расплав металлопокрытия ППМ по ГОСТ 21448-75 с гранулометрическим составом класса «С» изменяет размер и форму дендритных составляющих наплавленного слоя, способствует появлению карбидов, боридов и карбоборидов в структуре, что отражается на физико-механических свойствах покрытия. Кроме того, несоответствия режимов наплавки и скорости подачи присадки в расплав сварочной ванны приводят к неравномерности глубины проплавления и нарушениям качественного формирования наплаваемого слоя металла.

4. Для получения заданной структуры наплавленного электродуговой наплавкой покрытия с металлопорошковой присадкой имеет значение и место подачи присадки в расплав сварочной ванны [3]. На рисунке 2 представлены структуры наплавленных металлоповерхностей при вдувании металлопорошка в головную и хвостовую части расплава металла сварочных ванн. Для структуры металла с введением порошкового материала в головную часть сварочной ванны (рис. 2, а) характерно появление избыточных карбидов и эвтектики на их основе и, возможно, карбоборидов, окруженных эвтектикой. Увеличение времени нахождения частиц порошка в расплавленной ванне создает благоприятные условия для роста частиц избыточных фаз и увеличения размера игольчатых и стержневых включений. При наименьшем тепловложении (введение порошка в хвостовую часть расплава ванны) карбобориды формируются в виде глобулей, игл и стержней малых размеров (рис. 2, б). При введении порошкового присадочного материала охлаждение аустенита с большой скоростью препятствует превращениям в верхнем районе температур и приводит к образованию мартенсита с повышенным содержанием остаточного аустенита. Введение ППМ в расплав металла сварочной ванны изменяет режим её остывания, что сказывается на структуре наплавленного слоя. Чем больше скорость охлаждения, тем при более низкой температуре произойдет превращение, и поэтому тем более дисперсными и твердыми будут продукты превращения. Присутствие в кристаллизующемся растворе сварочной ванны частичек ППМ изменяет размер и форму дендритных составляющих наплавленного слоя, способствует появлению карбидов, боридов и карбоборидов в структуре, что отражается на физико-механических свойствах покрытия.

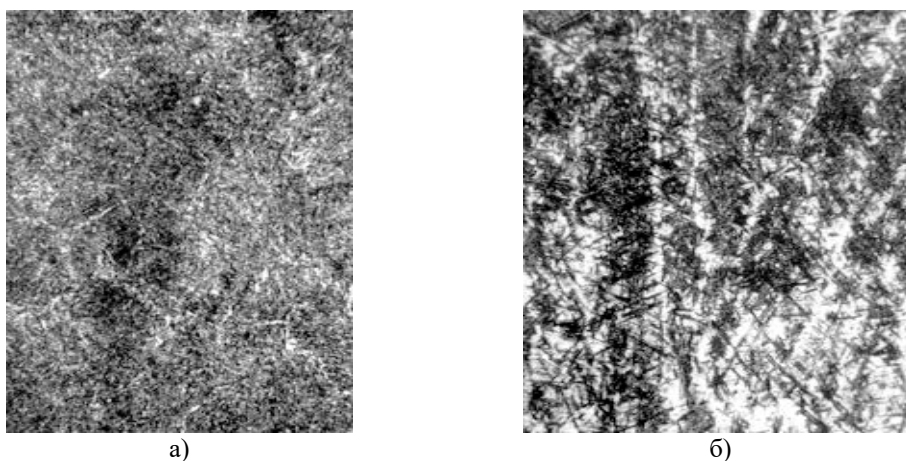


Рис. 2. Структура зоны наплавленного металла с введением ППМ×200:
 а – подача ППМ в головную часть сварочной ванны;
 б – подача ППМ в хвостовую часть сварочной ванны

Ввод ППМ в расплав сварочной ванны позволяет получить мелкозернистую структуру, уменьшает дендритный характер наплавленного металла, а также создаёт условия для получения равномерной и однородной структуры с крупными дендритными включениями, сориентированными в одном направлении, перпендикулярном основному металлу.

5. При нанесении износостойких металлоповерхностей на детали машин и механизмов методом наплавки с порошковой легирующей присадкой, состоящей из твёрдых частиц, которые распределяются в более мягкой матрице основного металла, особое внимание следует уделять материалу матричного слоя [3–5]. Он должен иметь высокую прочность, хорошо удерживать частицы присадки в покрытии, препятствовать чрезмерному их растворению, быть химически стабильным по отношению к твёрдой составляющей и соответствовать требованию термомеханической совместимости. При наплавке металлопокрытий с содержанием карбидов вольфрама и феррохрома в качестве матричного слоя рекомендуется использовать малоуглеродистые стали, так как износостойкость наплавленного слоя со связующим из нестабильного аустенита выше, чем из других наплавочных материалов. Гранулированные порошки во избежание образования пор и шлаковых включений должны содержать не более 0,08 % кислорода. Порошковые присадки с содержанием карбидов вольфрама характерны тем, что они не имеют строго определённого химического состава и при их формировании карбид вольфрама не кристаллизуется из расплава, а вводится в сплав-связку в виде заранее приготовленных зёрен нужного размера и формы. Технология и техника наплавки карбидных композиций должны обеспечивать введение в сварочную ванну частиц износостойкой фазы определённого размера и формы, причём эти частицы должны в минимальной степени растворяться в сплаве-связке и не претерпевать нежелательных превращений в результате температурного воздействия сварочного цикла. Наплавку медно-никелевых сплавов необходимо выполнять с добавлением в присадочный материал 0,2...0,4 % CaAl₂ (алюмокальция), который устраняет склонность наплавленного металла к возникновению пор и кристаллизационных трещин.

Заключение

По результатам научно-исследовательских и опытно-экспериментальных работ, выполненных с целью получения износостойких легированных металлоповерхностей методом электродуговой наплавки в среде защитного газа плавящимся электродом с порошковой присадкой из сплавов, а также на основе анализа и обобщения полученных результатов, определены некоторые важные технологические особенности, влияющие на качество наплавленных покрытий. Сущность этих особенностей заключается в их

комплексном влиянии на качество наплавленного слоя металла поверхности и зависит: от количества вводимой в расплав металла сварочной ванны металлопорошковой присадки, скорости подачи её в сварочную ванну, параметров последней и зоны введения присадки в расплав, а также от материала матричного слоя основного металла и технологических режимов процесса наплавки. Эти особенности, по мнению авторов, следует учитывать при разработке технологических процессов электродуговой наплавки в среде защитного газа с металлопорошковой присадкой. Применение предлагаемых технологических решений как в изготовительном, так и в восстановительном производствах машиностроения, позволит поднять качественный уровень защитно-упрочняющих металлоповерхностей деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного изнашивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудина, А. В. Технология формирования износостойких композиционных металлопокрытий электродуговой наплавкой с применением ультразвука // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Мн.: изд-во БНТУ, 2009. – 22 с.
2. Спиридонов, Н. В. Влияние режимов и способов введения порошковой присадки на качество наплавленного слоя в среде углекислого газа / Н. В. Спиридонов, В. В. Кураш, А. В. Кудина, В. В. Хроленок // Вестник Белорусского национального технического университета. Мн.: изд-во БНТУ, 2007. – № 6. – С. 24–27.
3. Кураш, В. В. Восстановление изношенных трибоповерхностей деталей машин электродуговой наплавкой с металлопорошковой композицией / В. В. Кураш, А. В. Кудина, Ю. И. Титов, О. В. Солонович // Материалы Международной научно-практической конференции «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК» 15–18 апреля 2009г. в 2-ч., Ч.1., Мн.: изд-во УО БГАТУ, 2009. – с. 384–390
4. Спиридонов Н. В. Электродуговая наплавка металлоповерхностей колеблющимся электродом в среде защитного газа / Н. В. Спиридонов, А. В. Кудина, В. В. Кураш // Наука и техника. Мн.: изд-во БНТУ, 2013. № 4. – С. 3–8.
5. Кудина, А. В. Технологическое обеспечение качества и надёжности деталей узлов трения машин и механизмов. / А. В. Кудина, М. С. Капица, И. О. Сокоров, Н. В. Спиридонов // «МАШИНОСТРОЕНИЕ» Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 30. Мн.: БНТУ, 2017. – С. 138–142.

УДК 621.794

Синькевич Ю.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Приведено описание вероятностно-статистического метода для исследования механизма формирования профиля поверхности при электроимпульсном полировании металлов и сплавов. Показано, что коррелограмма профиля поверхности является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих профиля и позволяет получать характеристики, как совокупного профиля поверхности, так и