

**ЛЕГИРОВАНИЕ ТРИБОПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕТАЛЛОПОРОШКАМИ  
ИЗНОСОСТОЙКИХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ  
С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ**

*1) Белорусский национальный технический университет*

*2) УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»*

*Минск, Беларусь*

*В технологиях получения износостойких металлопокрытий широко применяется метод электродуговой наплавки поверхностей плавящимся электродом в среде защитных газов с одновременным легированием наплавляемого слоя металла. Дается описание нового метода электродуговой наплавки с введением в расплав металла сварочной ванны легирующего металлопорошка и ультразвука, позволяющих значительно повысить физико-механические и эксплуатационные свойства наплавленной поверхности.*

Сложность современных технических систем машин и механизмов, многообразие режимов работы, повышение нагрузок и скоростей движения агрегатов требуют новых подходов к решению проблемы их надёжности. Способность технического объекта выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные характеристики, является неотъемлемой частью его надёжности. Одной из эксплуатационных характеристик любого механизма служит его производительность, а деталей - их износостойкость. В этой связи приобретает актуальность решение вопросов, связанных с повышением износостойкости поверхностей трения деталей машин. В настоящий момент существует много методов эффективного повышения стойкости поверхности деталей к износу для различных условий нагружения. Известны такие методы повышения износостойкости, как химико-термические, электрохимические, ионно-плазменные, газотермические, поверхностной пластической деформации, лазерного поверхностного упрочнения, лазерного легирования, ионной имплантации, плазменного нанесения покрытия, электроискровые, избирательного переноса, алмазного выглаживания, вибрационного обкатывания и др. Все эти методы основаны на преобразовании структуры и вида поверхности детали или на нанесении поверхностного защитного слоя, в результате чего создаётся благоприятный микрорельеф и существенно (в 2...4 раза) изменяются трибологические свойства поверхностных слоёв деталей машин. В технологии нанесения металлопокрытий, как в основном, так и ремонтном производстве, широко применяется метод наплавки поверхностей. Методом наплавки метал-лоповерхностей получают покрытия с износостойкими, кислотоупорными, коррозионностойкими, антифрикционными и другими свойствами. Наплавку применяют при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей, причём, она может выполняться различными методами и видами. Наиболее широко для нанесения металлоповерхностей применяют виды и приёмы метода электродуговой наплавки (сварки), которые перспективны и требуют дальнейшего исследования и совершенствования.

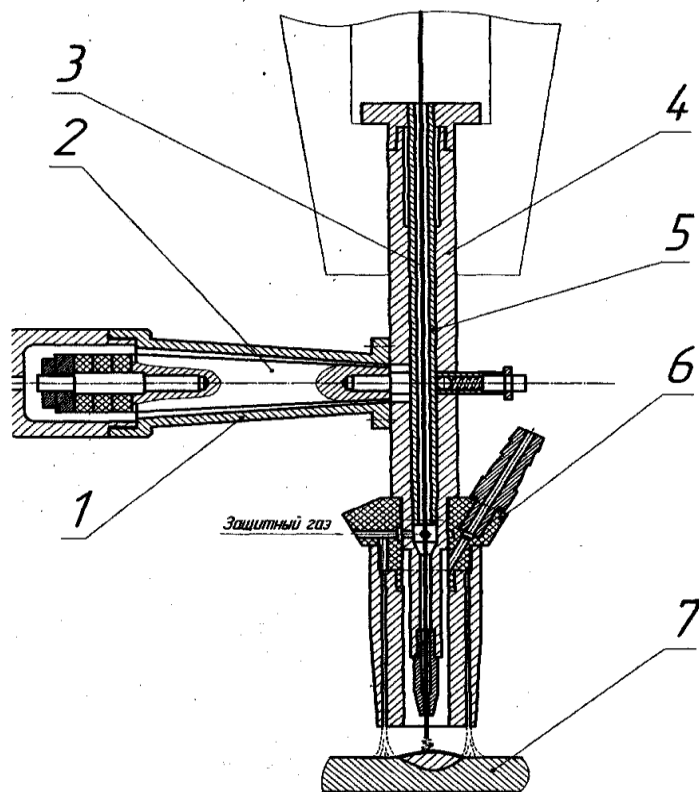
Наплавленным поверхностям, получаемым электродуговой наплавкой, свойственны металлургические и сварочные дефекты, присущие этим защитным покрытиям (поры, различные включения, несплошность, пузыри, трещины и пр.), а присутствие в покрытиях сотых и тысячных долей процента газовых и неметаллических примесей снижает механические характеристики и свойства последних. В металлургии для устранения дефектов подобного типа применяют обработку жидкого металла ультразвуком. Обработка жидкого металла ультразвуком позволяет очистить расплав от неметаллических включений путём вынесения на поверхность ванны из расплава мельчайших газовых пузырьков, частиц окислов, нитридов, сульфидов и других дефектов. При ультразвуковой обработке расплавленного металла не только снижается брак при формировании структуры, но и повышаются физико-механические характеристики конструкционных материалов. Ультразвуковое воздействие на процесс формирования покрытий в жидкой фазе способствует созданию в обрабатываемой среде интенсивного перемещения ее частиц благодаря различного рода микро- и макропотокам, что благоприятствует процессу кристаллообразования. Вместе с тем, при

нанесении покрытий из металлов серьезную проблему представляет предварительная подготовка поверхности основного металла, связанная с затратами на очистку, применение дополнительного оборудования и расходных материалов. Часто между соединением покрытие – основной металл невозможно создать атомно-молекулярную связь между ними без применения специальных веществ с поверхностно активными свойствами. Все это, практически, устраняется при нанесении покрытий из расплава в ультразвуковом поле. С применением ультразвука, как правило, отпадает необходимость в очистке поверхности под наплавку и создаются благоприятные условия для повышения качества и прочности сцепления наплавляемого покрытия с основным металлом [1,2].

Необходимые свойства наплавленных поверхностей обычно получают легированием, т.е. введением в их состав легирующих примесей. Эта технология позволяет получать рабочие поверхности деталей с заданными физико-механическими свойствами. Наибольшее распространение получило легирование путем введения в наплавочную ванну износостойких порошковых хромоникелевых сплавов, чистых металлов и металлоподобных соединений. Такой способ легирования широко применяется для наплавки металлоповерхностей, так как он экономичен и обеспечивает заданное содержание легирующих элементов в наплавленном слое металла [3].

При формировании металлопокрытий с подачей порошкового присадочного материала в расплавленный металл, необходимо учитывать целесообразность применения тех или иных легирующих элементов для выбранного объекта наплавки, а также потери этих элементов при выборе метода легирования. При наплавке сплошным проволочным электродом, химический состав наплавленного металла определяется концентрацией легирующих элементов в основе, электродной проволоке и порошковой присадке. В наплавленном композиционном слое металл основы и металл проволоки образуют матричный сплав, в который вплавлены твердосплавные частицы порошковой присадки, причём, все составные части жидкого металла перемешиваются, образуя монолитное металлопокрытие. Обработка жидкого металла порошками и добавками расплавленного электрода обеспечивает создание развитой контактной поверхности расширяющих фаз, активизирует реакции на границе твердая фаза – жидкость, ускоряет диффузионные процессы, интенсифицирует раскисление и легирование металла. Использование металлопорошковых смесей для активирования электродуговой наплавки и интенсификации процессов легирования имеет ряд особенностей. Объем жидкого металла в сварочной ванне, как правило, не превышает 1-2 см<sup>3</sup>, а его масса – 10 г. Из-за этого практически невозможна продувка газопорошковой смеси через расплав, и единственным реальным методом подачи порошковой присадки является ее введение на поверхность сварочной ванны. Для создания высоколегированных покрытий и максимального уменьшения тепловложения необходимо вводить значительный объем порошка (относительно объема жидкого металла) в короткий промежуток времени. При этом, важным условием является тщательный подбор скорости газопорошковой смеси. Это связано с тем, что высокоскоростная струя может нарушить формирование наружной поверхности покрытия, вызвать седлообразность наплавляемых валиков, наплывы, выплёскивание жидкого металла из ванны. Струя с малой скоростью не обеспечивает проникновения частиц с небольшой плотностью на необходимую глубину, а это приводит к неравномерности легирования покрытия по высоте. Размеры зоны ввода порошка не должны превышать размеров зеркала сварочной ванны. В противном случае возрастают потери дорогостоящей лигатуры порошкового материала. Целесообразно также присадку подавать в ванну, имеющую оптимальную температуру, где конвективные потоки обеспечивают равномерное легирование наплавленного металла. При нанесении износостойких слоев, состоящих из твердых частиц, распределенных в более мягкой матрице, особое внимание следует уделять материалу матричного слоя. Он должен иметь высокую прочность, хорошо удерживать частицы присадки в покрытии, препятствовать чрезмерному их растворению, быть химически стабильным по отношению к твердой составляющей и соответствовать требованию термомеханической совместимости. Карбиды хрома, вольфрама и никеля получили наибольшее распространение при газопорошковой и электродуговой наплавке износостойких покрытий, причем как для карбидов вольфрама, так и хрома используется матрица из малоуглеродистой стали. Поэтому при электродуговой наплавке твердых, износостойких слоев целесообразно применять малоуглеродистые проволоки, чтобы получать более мягкую и износостойкую матрицу. Применение в качестве присадочного материала хромоникелевых порошков позволяет получить слои наплавленного металла с высоким содержанием хрома, причем высокое содержание в них хрома и углерода дает возможность в широких пределах изменять концентрацию легирующих элементов и получать износостойкие покрытия с высокими физико-механическими и антикоррозионными свойствами [1,3]. Дозировка и подача порошка в ванну обычно

производится различными дозирующими механизмами и устройствами. Для введения порошковой присадки в ванну жидкого металла необходим такой способ, который позволял бы располагать подающее устройство на безопасном расстоянии от дуги, давал бы возможность вводить порошковую присадку в хвостовую зону ванны жидкого металла без потерь, обеспечивал бы создание развитой контактной поверхности реагирующих фаз и позволял бы регулировать процесс формирования качества наплавляемого слоя [1,5]. Так например, в металлургии для повышения качества металла применяют ультразвуковую обработку, а широкое применение её в различных технологических процессах свидетельствует, что она является одним из перспективных способов регулирования свойств твердого тела. Это касается преимущественно возможности использования метода ультразвуковой обработки в процессе затвердевания расплава металла. В этой связи при электродуговой наплавке представляет интерес подача ультразвуковых колебаний на плавящийся электрод (электродную проволоку) или в расплав металла сварочной ванны. Анализ существующих способов ввода ультразвука в расплавы, применительно к процессам электродуговой наплавки в среде защитных газов, показал, что способ подачи ультразвука на плавящийся электрод является наиболее предпочтительным. Такая схема введения ультразвука позволяет получать высококачественную структуру наплавленного слоя за счёт управления процессом кристаллизации расплава металла и получения надёжной изоляции сварочной ванны потоком защитного газа. Схема технологической оснастки для введения ультразвуковых колебаний и порошкового присадочного материала в зону наплавки представлена на рисунке 1.



1 - устройство передачи УЗК на электрод; 2 - волновод-концентратор; 3 - электродная проволока; 4 - корпус наплавочной головки; 5 - токовод; 6 - устройство для подачи газопорошковой смеси; 7 – наплавляемая поверхность

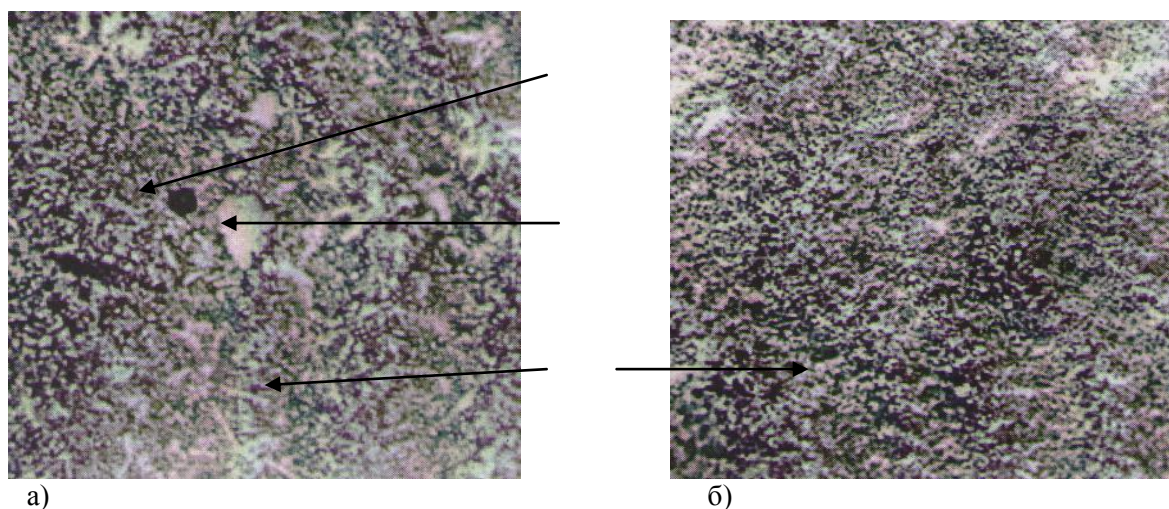
Рис. 1 - Схема технологической оснастки для введения ультразвуковых колебаний и порошкового материала в зону наплавки

Все узлы оснастки монтируются на корпусе наплавочной головки (поз.4). Устройство передачи УЗК на электрод (поз.1) с пакетом пьезокерамических пластин является основным рабочим органом

оснастки. Пьезоэлементы преобразователя ультразвуковых колебаний через волновод-концентратор (поз.2) передают ультразвуковые колебания наконечнику токовода (поз.5) и далее электродной проволоке (поз.3).

Питание ультразвукового преобразователя осуществляется от ультразвукового генератора. Разработанные и запатентованные способы подачи ультразвуковых колебаний в зону наплавки [2,4] позволяют, не разрывая оболочки факела защитного газа подавать поперечные ультразвуковые колебания в зону расплавленного металла и влиять на процесс кристаллообразования в наплавляемых слоях. Под воздействием ультразвуковых волн происходит упорядоченный и направленный каплеперенос электродного металла, ограничивается перемещения электрической дуги, происходит дробление капель электрода на мельчайшие частички, которые в расплаве основного металла интенсифицируют процесс зародышеобразования кристаллов и способствуют формированию однородной мелкозернистой структуры с кристаллами правильной формы. При этом ультразвук повышает плотность и давление газовой оболочки, делает ее сплошной, без завихрений, что приводит к снижению разбрызгивания электродного металла. Такой способ электродуговой наплавки позволяет формировать наплавленный слой с однородной, мелкозернистой структурой, что обеспечивает повышение физико-механических и прочностных свойств полученной поверхности.

Результаты исследований микроструктуры поверхностей, наплавленных проволокой Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 с ППМ (металлопорошковым присадочным материалом) из сплавов ПГ-СР3 ГОСТ 21448-75 показывают, что структура покрытий наплавленных без ультразвука (см. рисунок 2а) имеет зёрна размером  $(70...90) \times 10^{-2}$  мкм и металлургические дефекты (поры, флокены), чего не наблюдается в структуре слоя, наплавленного с ультразвуком (см.рисунок 2б), которая имеет однородное строение и более мелкое зерно размером  $(30...45) \times 10^{-2}$  мкм [6]. Это можно объяснить тем, что дробление капель плавящегося электрода ультразвуком и введение ППМ способствуют появлению дополнительных центров кристаллизации в расплаве металла сварочной ванны, кроме того, введение ППМ уменьшает долю участия основного металла в формировании наплавленного валика, а всё это приводит к изменению характера структуры и формы зерна, уменьшению его величины, устранению столбчатости и образованию равноосных зерен. Состав ППМ влияет на фазовые структурообразования наплавленного слоя, которые, в дальнейшем, определяют его качество и эксплуатационные характеристики. Бориды никеля и хрома износостойкой порошковой присадки, распределяясь в расплаве металла, образуют в наплавленном слое твердосплавные включения с мягкой матричной основой. Такая структура получается однородной и хорошо противостоит изнашиванию. Результаты оптической микроскопии показали, что при применении разработанной технологии наплавки формируется равноосная мелкозернистая структура с числом зерен  $10^6$  и более шт/мм<sup>2</sup>.



а) – без применения УЗК, б) – с применением УЗК(  $A=12...15$ мкм,  $f=24$ кГц)  
1- пора, 2 – флокен, 3 - межкристаллитные пленки

Рис. 2 - Микроструктура легированных металлопокрытий, полученных наплавкой в среде защитного газа с ППМ, х 500

Качественный и количественный рентгенофазовый анализ структуры наплавленных покрытий показал их сложное гетерофазное строение, причём, формирующиеся фазы несколько отличаются по микротвердости. Это способствует формированию в металлопокрытии твёрдых, износостойких частиц в мягкой основе и получению относительной износостойкости металлопокрытия  $\varepsilon = 2,6 - 2,75$  (по сравнению со сталью 45). Анализ структур наплавленных слоёв металла показал [6], что качество слоя, наплавленного с применением УЗК, значительно выше, чем слоя, наплавленного без УЗК. При наплавке с ультразвуковыми колебаниями практически отсутствует граница раздела слоёв (покрытие-основа), что позволяет обеспечить более высокую прочность сцепления наплавленного слоя с основой и плавный градиент прочностных свойств.

Наиболее существенным эффектом наплавки, наблюдаемым при обработке кристаллизующегося металла ультразвуком, является измельчение величины зерен [2,4]. Ультразвуковые колебания электрода вызывают диспергирование плавящегося металла, а образующиеся мелкодисперсные капельки его вместе с частичками металлопорошковой присадки, попадая в расплав сварочной ванны, становятся центрами зарождения кристаллов, вокруг которых происходит их рост в ограниченном пространстве. А так как процесс кристаллизации начинается с возникновения в жидкой фазе металла небольших объемов зародышей твердой фазы (центров кристаллизации) с их быстрым последующим ростом, то чем больше в расплаве металла образуется зародышей, тем мельче будет его зернистость и выше однородность структуры. Кроме того, ультразвук, воздействуя на кристаллизующийся металл сварочной ванны, тормозит рост образовавшихся кристаллов, не позволяя им достигать крупных размеров.

#### **Выводы.**

1. При электродуговой наплавке металлоповерхностей плавящимся электродом в среде защитного газа, одновременная подача ультразвуковых колебаний и легирующей порошковой присадки внутрь факела защитного газа позволяет, не разрывая оболочки факела, вводить металлопорошок и поперечные ультразвуковые колебания в зону плавления металла, что качественно повышает процесс кристаллообразования и структуру наплавленного слоя.

2. Под воздействием ультразвуковых волн создается упорядоченное перемещение электрической дуги и тонкое измельчение капель электродного металла, частицы которых, попадая в расплав сварочной ванны, интенсифицируют процесс зародышеобразования кристаллов и способствуют формированию упорядоченной и однородной структуры металла с кристаллами правильной формы.

3. Ультразвук повышает цельность и плотность защитной газовой оболочки, делает ее сплошной, без завихрений, что приводит к стабильному горению электрической дуги и снижению разбрызгивания электродного металла. Цельность и плотность оболочки защитного газа надёжно защищает сварочную ванну от внешней среды, что способствует образованию бездефектной структуры наплавленного слоя металла.

4. При электродуговой наплавке, введение в расплав металла легирующего присадочного материала из металлопорошков износостойких сплавов и подача ультразвука на плавящийся электрод обеспечивают получение износостойких трибоповерхностей деталей узлов и механизмов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, что позволяет повысить надёжность машин и технологического оборудования.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ивашко, В.С. Формирование качественных износостойких металлопокрытий способом электродуговой наплавки в ультразвуковом поле с введением в расплав твердосплавной порошковой присадки / В.С. Ивашко, В.В. Кураш, А.В. Кудина // Теория и практика машиностроения. – Мн.: из-во БНТУ, 2003г. – №2. – С.77 – 81.

2. Шелег В.К. Способ электродуговой наплавки металла в среде защитных газов с применением ультразвука: пат. Респ. Беларусь № 7022 С1 В 23К 9/04 - / В.К. Шелег, В.В. Кураш, В.Т. Минченя, М.Г. Киселёв, В.В. Хроленок; заяв. ГУ «НИКТИ СП с ОП» - № а 20000956; заявл.24.10.2000.; зарегистр. в Госреестре изобретений 14.01.2005г.

3. Спиридонов, Н.В. Легирование металлоповерхностей при электродуговой наплавке с подачей ультразвуковых колебаний на плавящийся электрод // Н.В. Спиридонов, В.В. Кураш, А.В. Кудина, А.Н.

4. /«Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки»: материалы 10-й юбилейной Международной научно-практической конференции. - Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2008 г.: в 2-х ч. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2008.–Ч.1.– С. 291–296.

5. Кураш В.В. Способ нанесения на поверхность детали легированного мелкозернистого металлопокрытия : пат. № 16225 Республика Беларусь, С1, 2012.08.30, МПК В23К 9/04 (2006.01) / Кураш В.В., Спиридонов Н.В., Кудина А.В.; заявитель – УО «БГАТУ». – а 20100538, заявлено 2010.04.09; зарегистрировано в Госреестре изобретений 2012.05.11.

6. 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, 2007г.– № 6. – С.24 – 27.

7. Кудина А.В. Технология формирования износ-коррозионностойких 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.