

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ

А. В. Кудина¹, И. О. Сокоров², А. А. Андрушевич³

¹ К. т. н., доцент УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь

² К. т. н., доцент Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь

³ К. т. н., доцент УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Беларусь

Реферат

В статье изложены результаты исследований структуры и физико-механических свойств металлопокрытий, полученных электродуговой наплавкой в среде защитного газа с применением ультразвука. Полученные металлопокрытия формируются с более высокими механическими и эксплуатационными характеристиками. Предлагаемые новые способы и устройства для наплавки позволяют снизить остаточные напряжения в детали, повышают прочность изделия, увеличивают твердость покрытия на 20...25%, что уменьшает в 1,7...1,9 раза интенсивность изнашивания поверхности трения деталей машин и повышает их ресурс и надёжность.

Ключевые слова: наплавка, металлопокрытие, структура металла, ультразвук, качество и износостойкость поверхности.

ELECTRIC ARC SURFACING OF METAL POWDER COATINGS UNDER ULTRASONIC INFLUENCE ON THE PROCESS OF STRUCTURE FORMATION

A. V. Kudina, I. O. Sokorov, A. A. Andrushevich

Abstract

In article results of researches of structure and physico-mechanical properties of the metal coatings received electroarc welding in the environment of protective gas with application of new technical decisions are stated. The received metal coatings are formed with higher physico-mechanical and operational characteristics. Offered new way and the device for наплавки allow to lower residual pressure in metal that raises durability of a product, increase hardness of a covering on 20 ... 25 %, reduce in 1,7 ... 1,9 times intensity of wear process of surfaces of a friction of details of cars that raises their resource and reliability.

Keywords: surfacing, metal coating, metal structure, ultrasound, surface quality and wear resistance.

Введение

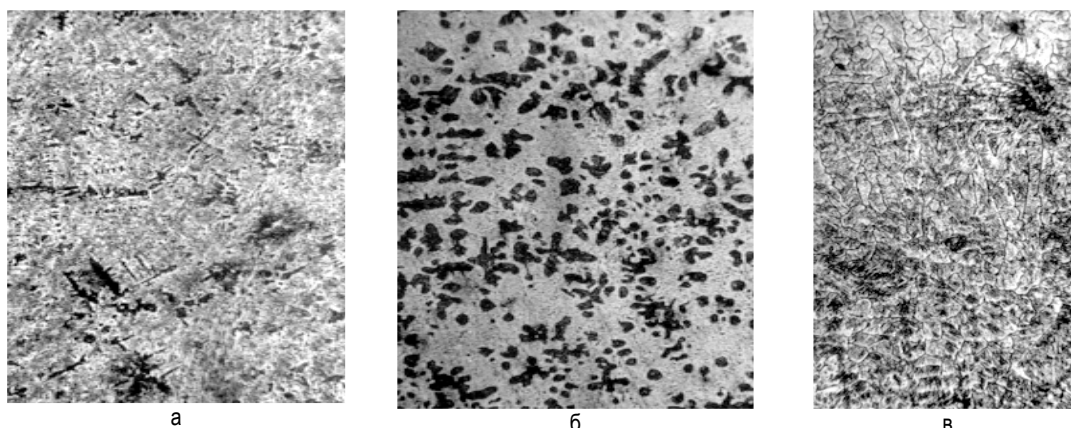
Получение любого металлопокрытия электротермическими способами связано с процессом массообмена между поверхностью основы изделия и компонентами наносимого материала. Скорость протекания массообмена достаточно мала, что затрудняет контроль и управление процессом формирования структуры металла в зоне сцепления (основа – покрытие) и ведет к снижению механических и эксплуатационных показателей формируемых покрытий. В связи с этим возникает необходимость в создании новых способов получения, управления и контроля процессами нанесения износостойких покрытий, повышающих их эффективность и качество за счёт применения физических эффектов, влияющих на структурные преобразования получаемой поверхности, в частности ультразвуковых колебаний (УЗК).

Ультразвуковое воздействие на процесс формирования металлопокрытий в жидкой фазе способствует созданию в обрабатываемой среде интенсивного перемещения ее частиц благодаря различного рода микро- и макропотокам, что благоприятствует процессу кристаллообразования. Кроме того, при нанесении покрытий 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 молекулярную связь без применения специальных веществ с поверхностно активными свойствами. Все это практически устраняется при нанесении покрытий из расплава в ультразвуковом поле. Как правило, отпадает необходимость в очистке, создаются благоприятные условия повышения качества поверхности и управления процессом его нанесения. Присутствие в покрытиях даже сотых и тысячных долей газовых и неметаллических примесей снижает их механические характеристики. В металлургии обработка расплавленного металла УЗК позволяет очистить жидкий металл от неметаллических включений путем вынесения на поверхность ванны из расплава мельчайших газовых пузырьков и частиц окислов, нитридов, сульфидов и др. При ультразвуковой обработке расплавленного

металла не только снижается пористость, но и повышаются физико-механические свойства конструкционных материалов [1]. В настоящее время применение ультразвука в технологиях сварки и наплавки изучено ещё недостаточно глубоко, поэтому с целью получения качественной наплавленной поверхности металлических изделий, а также широкого использования перспективных технологий наплавки, предложены новые технические решения, которые помогут повысить качество и надёжность деталей машин и механизмов.

Основная часть

В результате научных исследований технологического процесса электродуговой наплавки металлопокрытий в среде защитного газа разработаны новые перспективные технические решения: устройство для передачи ультразвуковых колебаний на плавящийся электрод и способ нанесения на поверхность детали легированного мелкозернистого металлопокрытия [2, 3]. Устройство для передачи УЗК позволяет диспергировать образующиеся капли расплавленного электродного металла на мелкие частицы, которые в сварочной ванне становятся дополнительными центрами кристаллизации. Применение предложенного способа нанесения обеспечивает получение на поверхности деталей легированных, упрочняющих металлопокрытий с однородной мелкозернистой структурой и повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Такие технические решения позволяют, не разрывая оболочки факела защитного газа, подавать поперечные ультразвуковые колебания в зону расплавленного металла и влиять на процесс кристаллизации в наплавливаемых слоях. Под воздействием ультразвуковых волн происходит упорядоченный и направленный каплеперенос расплава электродного металла, ограничивается перемещение электродуги, 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,



а - подача ППМ в головную часть сварочной ванны;
 б – подача ППМ в центр сварочной ванны;
 в – подача ППМ в хвостовую часть сварочной ванны

Рисунок 1 – Структура зон наплавленного с ППМ слоя $\times 200$

что приводит к снижению разбрызгивания электродного металла. Причём, при электродуговой наплавке с вводом в сварочную ванну порошкового присадочного материала (ППМ) происходит формирование микроструктуры дисперсных кристаллов, которая является характерной для всех полученных металлопокрытий.

Исследования микроструктур слоев, наплавленных проволокой Св-08Г2С ГОСТ 2246-70 с металлпорошковой присадкой из сплавов ПГ - СРЗ ГОСТ 21448-75 без использования ультразвука, показали, что структуры имеют зёрна размером $(70...90) \cdot 10^{-2}$ мкм и металлургические дефекты (поры, флокены, неметаллические включения) [2, 3, 4]. В структуре слоя, наплавленного с ультразвуком, наблюдается более однородное строение и мелкое зерно размером $(30...45) \cdot 10^{-2}$ мкм. Это можно объяснить только тем, что дробление капель плавящегося электрода ультразвуком и введение порошкового присадочного материала способствуют появлению множества дополнительных центров кристаллизации в расплаве металла. Кроме того, ППМ уменьшает долю участия основного металла в формировании наплавленного валика, что приводит к изменению характера структуры и формы зерна.

При получении металлопокрытий по предлагаемой технологии наплавки структура наплавленных слоёв зависит также от места введения ППМ в зону сварочной ванны. Изучение микрошлифов наплавленных поверхностей образцов чётко выявило зоны сплавления и наплавки: зона сплавления, расположенная между основным металлом (не подвергшимся термическому влиянию) и зоной наплавки, состоящей из нескольких участков наплавленного металла [4, 5, 6]. В каждом конкретном случае в зависимости от условий нагрева и охлаждения участки наплавленных слоёв претерпевают различные структурные превращения. Структуры зон наплавленного металла представлены на рис. 1. Для структуры наплавленного металла с введением ППМ (ПГ - СРЗ) в головную часть сварочной ванны (рис. 1а) 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 меньшем теплосеносе карбобориды формируются в виде глобулей, игл и стержней малых размеров. Введение порошкового присадочного материала способствует охлаждению аустенита, что препятствует превращениям в верхнем районе температур и приводит к образованию мартенсита с повышенным содержанием остаточного аустенита. ППМ изменяет режимы остывания сварочной ванны, что сказывается на структуре наплавленного слоя. Чем больше скорость охлаждения, тем при более низкой температуре произойдет превращение, и поэтому более дисперсными и твердыми будут продукты превращения. Присутствие ППМ в расплаве металла изменяет размер и форму дендритных составляющих наплавленного слоя, способствует появлению карбидов,

боридов и карбоборидов в структуре, что отражается на физико-механических свойствах покрытия.

При наплавке с вводом ППМ в центр сварочной ванны (рис. 1б) меняется размер и форма структурных составляющих по глубине: более округлая форма у поверхности, ярко выраженная дендритная структура в глубине слоя и у границы сплавления с основным металлом. Четкая ориентация нарушается, т.е. появляются заметные изменения в формировании структуры наплавленного слоя.

Введение ППМ в хвост сварочной ванны (рис. 1в) позволяет получить мелкозернистую структуру, уменьшает дендритный характер наплавленного металла. Ввод ППМ в хвост сварочной ванны позволяет получить равномерную однородную структуру с крупными дендритными включениями, сориентированными в одном направлении, перпендикулярном основному металлу. При подаче ППМ в хвостовую часть сварочной ванны наблюдается разветвление дендритов и мартенситное превращение, проявляется игольчатое строение, характерное для закалки. Это объясняется уменьшением градиента температуры расплава металла перед фронтом кристаллизации.

Состав ППМ влияет на фазовые структурообразования наплавленного слоя, которые в дальнейшем определяют его качество и эксплуатационные характеристики [6]. Бориды никеля и хрома металлпорошковой 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 с применением в технологии электродуговой наплавки предлагаемых способов и устройств, при кристаллизации расплава металла формируется равноосная мелкозернистая структура с числом зерен 10^6 и более шт/мм² [4]. Качественный и количественный рентгенофазовый анализ структуры наплавленных покрытий показал их сложное гетерофазное строение, при этом, формирующиеся фазы несколько отличаются по микротвердости. Это способствует формированию в металлопокрытии твердых, износостойких частиц в мягкой основе и получению относительной износостойкости металлопокрытия $\varepsilon = 2,6 - 2,75$ (по сравнению с основным металлом образцов) [4].

Визуальная оценка качества полученных наплавкой валиков показывает, что из всех исследованных технологических режимов заметно выделяются образцы, полученные с применением УЗК: качество наплавленного слоя их значительно выше. На этих образцах ровные и плотные валики, отклонений от формы и поверхностных дефектов не наблюдалось, практически отсутствует граница раздела покрытия с основой, что обеспечивает более высокую прочность сцепления наплавленного слоя с основным металлом, а значит и плавный градиент прочностных свойств.

Таблица 1 – Результаты испытаний на изнашивание наплавленных покрытий при контактном давлении $P = 15 \text{ МПа}$, длине пути трения $S = 1 \text{ км}$

Вид изнашивания	Способ наплавки поверхностей	Присадочный материал	Износ, мкм					Усредненная величина износа, мкм	Интенсивность изнашивания, $\times 10^{-6}$
			Группы деталей						
			№1	№2	№3	№4	№5		
Абразивное	Электродуговая наплавка электродной проволокой Св-08Г2С	нет	9830	10100	9720	10450	10800	10180	10,18
	Электродуговая наплавка электродной проволокой Св-08Г2С с присадкой	ППМ	5700	5650	5750	5600	5700	5680	5,68
Коррозионно-механическое	Электродуговая наплавка электродной проволокой Св-08Г2С	нет	1100	1050	1180	1100	1220	1086	1,08
	Электродуговая наплавка электродной проволокой Св-08Г2С с присадкой	ППМ	570	560	580	550	560	564	0,56

При получении наплавленных слоев как в металле основы, так и в наплавочных валиках возникают значительные сварочные напряжения до 300 МПа. Несмотря на то, что уровень остаточных растягивающих напряжений ниже предела текучести материала, такое напряженное состояние валика и зоны сплавления является опасным, т. к. повышается склонность к хрупкому разрушению. Применение УЗК при наплавке приводит к изменению структуры как наплавленных валиков, так и зоны сплавления, и снижению внутренних напряжений, что показывают результаты выполненных исследований. В зоне основного металла происходит измельчение зерен в 2...3 раза, в самом наплавленном покрытии структура формируется плотной мелкозернистой с включением и равномерным размещением твердых частиц порошкового материала. Структурные изменения сопровождаются изменением свойств материалов. Зона термического влияния имеет наименьшую поверхностную твердость как в исходном, так и после наплавки с УЗК состояниях [4]. Это связано с обезуглероживанием поверхности при сильном нагреве в процессе наплавки. Наблюдается плавный переход к уровням твердости основного металла и наплавленного валика. Несколько большая твердость валика, наплавленного с УЗК, объясняется природой воздействия ультразвуковых колебаний на процесс кристаллизации металла. Снижение обезуглероживания в зоне термического влияния практически до исходного значения и понижение твердости металла в этой зоне можно объяснить снижением температурного градиента за счет введения в расплав порошка и от воздействия УЗК. По результатам экспериментальных исследований [1] установлено, что на образцах, наплавленных без УЗК, при числе циклов нагружения $N = 2 \cdot 10^3$ в зоне термического влияния проявляются поля локальных деформаций с участками пластических сдвигов и микротрещин размером 150...300 мкм. В образцах, наплавленных с УЗК, только после длительного воздействия переменной нагрузкой $N = (75...80) \cdot 10^3$, обуславливающей накопление скрытых дефектов и микроповреждений в металле, лишь в отдельных образцах на границе сплавления валиков происходит зарождение усталостных микротрещин. Следовательно, наплавка с УЗК и металлопорошковой присадкой способствует снижению градиента температуры по сечению наплавленного слоя и увеличению скорости кристаллизации, что приводит к умень-

шению остаточных напряжений в металле и увеличению твердости покрытия на 20...25% [4].

Результаты исследований на изнашивание металлопокрытий образцов, наплавленных с ППМ при одновременном воздействии ультразвуковыми колебаниями на их формирование, приведены в табл. 1. Для экспериментов готовились опытные образцы следующим образом: на пластины из стали 45 ГОСТ 380-2005, размером 70x25x12 мм, электродуговой наплавкой плавящимся электродом из проволоки Св-08Г2С наносились металлопокрытия с одновременным введением в расплав сварочной ванны ППМ легирующего состава [4]. Затем из наплавленных пластин вырезались образцы размером 12x12x4 мм для проведения испытаний на изнашивание. Толщина 4 мм соответствовала толщине наплавленного слоя. Из полученных образцов формировали 5 групп таким образом, чтобы поверхность каждого образца группы представляла собой зону, удаленную от поверхности наплавки вглубь наплавленных валиков соответственно на 0,0; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 мм. Послойное изготовление образцов осуществлялось с целью последующей проверки износостойкости наплавленного металлопокрытия по глубине.

Изнашивание образцов проводили на машине трения СМТ-70 согласно методикам для проведения испытаний материалов на износостойкость при трении по ГОСТ 23.207-79 и ГОСТ 23.211-80 с подачей в зону трения абразивных и биокоррозионных композиций. Величина износа определялась на профилографе-профилометре модели 252 по глубине вытертой канавки. На основании полученных результатов исследований следует заключить, что такая технология наплавки повышает физико-механические и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя металла: увеличивает твердость поверхности на 20...25%, повышает циклическую долговечность в 2...3 раза, снижает интенсивность изнашивания металла поверхностей трения в 1,7 - 1,9 раза (табл. 1). Анализ результатов испытаний наплавленных металлопокрытий опытных образцов на изнашивание показывает, что применение для наплавки поверхностей разработанных новых технических решений [2, 3] даёт возможность существенно снизить интенсивность изнашивания поверхностей трения деталей машин и механизмов. Это позволяет отнести сформированные с использованием УЗК металлопокрытия к более высокому

классу износостойкости, что, безусловно, обеспечит увеличение ресурса как деталей узлов и агрегатов машин, так и технологического оборудования в целом. Следовательно, применение выше указанных новых технических решений в технологии сварки и наплавки позволит значительно повысить качество и надёжность деталей узлов и механизмов технологического оборудования.

Заключение

Результаты исследований наплавленных слоёв, полученных электродуговой наплавкой в среде защитного газа с порошковой присадкой при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний, показывают, что их применение существенно повышает физико-механические и эксплуатационные характеристики металлопокрытий деталей узлов трения машин и технологического оборудования, что ведёт к увеличению ресурса, надёжности и долговечности. Такая технология наплавки металлопокрытий позволяет методом варьирования составом присадочного материала формировать слои с заданными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Применение предлагаемых новых технических решений для упрочнения триболовностей деталей узлов и механизмов как машин, так и технологического оборудования даёт возможность снизить остаточные напряжения в металле после наплавки, что повышает прочность изделия, увеличивает твёрдость покрытия на 20...25%, позволяет в 1,7...1,9 раза снизить интенсивность изнашивания поверхностей трения деталей машин, работающих в условиях абразивного и коррозионно-механического изнашивания, чем обеспечивается в трибосопряжениях более высокий класс износостойкости рабочих поверхностей, увеличивается ресурс узлов и механизмов, а значит, надёжность машин и технологического оборудования в целом.

Список цитированных источников

- 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. – Минск : Из-во БНТУ, 2003. – № 2. – С. 77–81.
- Устройство для передачи ультразвуковых колебаний на плавящийся электрод: пат. 10655 Республика Беларусь, С1 2008 2008.06.30 С1, МПК(2006), В23 К0/173/ В. В. Кураш, В. С. Ивашко, А. В. Кудина, В. Т. Минченя, В. В. Хроленок; заявитель УО БГАТУ. – № а20060370; заявл. 20.04.06; опубл. 21.02.08 // Афіцыйны бюл. / Вынаходствы, карысныя мадэлі, прамысловыя узоры. – 2008. – № 3. – С. 75–76.
- Способ нанесения на поверхность детали легированного мелкозернистого металлопокрытия : пат. № 16225 Республика Беларусь, С1, 2012.08.30, МПК В23К 9/04 (2006.01) / В. В. Кураш, Н. В. Спиридонов, А. В. Кудина; заявитель – УО БГАТУ. – № а20100538, заявлено 2010.04.09; зарегистрировано 2012.05.11.
- 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. – Минск : Изд-во БНТУ, 2009. – 22 с.
- Кудина, А. В. Улучшение качества триболовностей стальных деталей и технологического оборудования методом электродуговой наплавки / А. В. Кудина, В. С. Ивашко // Агропанорама. – Минск : Изд-во УО БГАТУ, 2016. – № 3. – С. 22–25.
- Анисович, А. Г. Структуры металлов и сплавов в технологических процессах машиностроения / А. Г. Анисович, А. А. Андрушевич – Минск : Беларуская навука, 2018. – 134 с.

References

- Ivashko, V. S. Formirovanie kachestvennyh iznosostojkij metallopokrytij sposobom elektrodugovoj naplavki v ul'trazvukovom pole s vvedeniem v rasplav tverdosplavnoj poroshkovoј prisadki / V. S. Ivashko, V. V. Kurash, A. V. Kudina // Teoriya i praktika mashinostroeniya. – Minsk : Iz-vo BNTU, 2003. – № 2. – S. 77–81.
- Ustrojstvo dlya peredachi ul'trazvukovyh kolebanij na plavyashchijsya elektrod: pat. 10655 Respublika Belarus', S1 2008 2008.06.30 S1, MPK(2006), V23 K0/173/ V. V. Kurash, V. S. Ivashko, A. V. Kudina, V. T. Minchenya, V. V. Hrolenok; zayavitel' UO BGATU. – № a20060370; zayavl. 20.04.06; opubl. 21.02.08 // Aficyjny byul. / Vynahodstvy, karysnyya madeli, pramyslovyya uzory. – 2008. – № 3. – S. 75–76.
- Sposob nanoseniya na poverhnost' detali legirovannogo melkozernistogo metallopokrytiya : pat. № 16225 Respublika Belarus', S1, 2012.08.30, MPK V23K 9/04 (2006.01) / V. V. Kurash, N. V. Spiridonov, A. V. Kudina; zayavitel' – UO BGATU. – № a20100538, zayavleno 2010.04.09; zaregistrirovano 2012.05.11.
- Kudina, A. V. Tekhnologiya formirovaniya iznoso-korrozion-nostojkij kompozicionnyh metallopokrytij elektrodugovoj naplavkoј s primeneniem ul'trazvuka : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchynoj stepeni kandidata tekhnicheskijh nauk po special'nosti 05.03.01 – Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki. – Minsk : Izd-vo BNTU, 2009. – 22 s.
- Kudina, A. V. Uluchshenie kachestva tribopoverhnostej stal'nyh detalej i tekhnologicheskogo oborudovaniya metodom elektrodugovoj naplavki / A. V. Kudina, V. S. Ivashko // Agropanorama. – Minsk : Izd-vo UO BGATU, 2016. – № 3. – S. 22–25.
- Anisovich, A. G. Struktury metallov i splavov v tekhnologicheskijh processah mashinostroeniya / A. G. Anisovich, A. A. Andrushevich – Minsk : Belaruskaya navuka, 2018. – 134 s.

Материал поступил в редакцию 12.10.2020