

УДК 621.791.92

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА С БОРИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

© 2011 г. **А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, Ю.Н. Дубцов, В.И. Лысак**

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)

А.А. Артемьев – аспирант кафедры оборудования и технологии сварочного производства ВолГТУ (400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28). E-mail: Artspace7@yandex.ru.

Г.Н. Соколов – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. Тел.: (8442) 23-20-53. E-mail: gnsokolov@yandex.ru.

Ю.Н. Дубцов – аспирант той же кафедры. E-mail: dubcow@mail.ru.

В.И. Лысак – докт. техн. наук, проф., заведующий той же кафедрой, проректор по НИР ВолГТУ. Тел.: (8442) 23-20-53. E-mail: lysak@vstu.ru.

Исследованы возможность создания и характер формирования композиционной структуры износостойкого сплава, наплавленного электрошлаковым способом, путем введения в жидкую металлическую ванну тугоплавких гранул диборида титана. Наплавка осуществлялась с применением порошковых проволок, содержащих в составе шихты порошок диборида титана с размером гранул 5–30 мкм, количество которого варьировалось в диапазоне 8–28 мас.%. Выполнены металлографические и дюрOMETрические исследования, а также испытания на абразивную износостойкость наплавленных образцов. Показано, что в процессе наплавки формируется композиционная структура металла, обеспечивающая повышение твердости и износостойкости получаемого покрытия. Определены пути увеличения износостойкости наплавленного металла в условиях легирования боридами тугоплавких металлов.

Ключевые слова: композиционная структура, электрошлаковая наплавка, диборид титана, порошковая проволока, абразивная износостойкость.

Development and formation of composite structure of wear-resistant alloy built-up by electros slag method by introduction of high-melting titanium diboride granules into welding pool have been investigated. The surfacing was executed with flux cored wires containing titanium diboride powder with granules of 5–30 μm in size the amount of which was varied in a range of 8–28 wt.%. Metallographic and durometric investigations as well as abrasion resistance tests of built-up specimens have been carried out. Ensuring increase in hardness and wear resistance of the coating, metal composite structure is shown to form in the process of surfacing. The ways of increase in wear resistance of built-up metal in the conditions of alloying by high-melting metal borides are specified.

Key words: composite structure, electros slag surfacing, titanium diboride, flux cored wire, abrasion resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «композиционная структура» может относиться почти ко всем сплавам, имеющим гетерофазный состав. Различают два ее типа:

– структура «естественного» композита, отличающаяся направленным расположением в металле первичных дендритов, образующих пластичную матрицу, и твердых эвтектических фаз, формирующих каркас сплава;

– структура «искусственного» композита, характерная для износостойких сплавов, в пластичную матрицу которых принудительно внедрены твердые частицы карбидов, боридов, нитридов и других тугоплавких соединений.

Более эффективный в условиях абразивного изнашивания металл со структурой «искусственного» композита получают различными способами, в том числе газопламенной, индукционной, дуговой и электрошлаковой (ЭШН) наплавкой [1–3]. В сравнении с другими процессами последний обладает рядом преимуществ:

– имеет мягкий термомодеформационный цикл, что обеспечивает невысокий уровень остаточных напряжений при формировании как тонких (3–5 мм), так и массивных (до 50 мм) покрытий;

– при металлургической обработке низкотемпературным (1600–1800 °С) шлаком порошки тугоплавких соединений, активируясь с поверхности и незначительно растворяясь, переходят в наплавленный металл, который благодаря качественному рафинированию от вредных примесей приобретает высокую стойкость к образованию трещин, газовых и неметаллических включений;

– плоский фронт кристаллизации способствует направленному росту дендритов, что повышает износостойкость наплавленного металла.

В наплавочных материалах (электродах, присадочных стержнях и порошковых смесях) в качестве упрочняющих фаз применяют порошки карбидов, боридов (CrB_2 , W_2B_5 , $(\text{Ti,Cr})\text{B}_2$) и др. Однако более технологичным представляется использовать в этих целях порошковую проволоку, содержащую в составе шихты диборид титана, который имеет вы-

сокие показатели физико-механических свойств ($t_{пл} = 3193$ °С, $H_{\mu} = 34,8$ ГПа) и сравнительно низкую стоимость.

Цель данной работы – исследование особенностей формирования в процессе электрошлаковой наплавки композиционной структуры износостойкого сплава, упрочненного гранулами TiB_2 , введенными в наплавленный металл из порошковой проволоки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные порошковые проволоки диаметром 3,8 мм и коэффициентом заполнения 0,65 изготавливали на волочильном стане ОБ-575 из ленты Св-08кп (17,4×0,25 мм). Шихта для их получения состояла из феррохрома, технически чистых металлических порошков марганца и никеля, а также порошка диборида титана с размером гранул 5–30 мкм. Его количество, исходя из задачи формирования качественного износостойкого наплавленного металла, варьировали в диапазоне 8–28 мас.%. Расчетный состав порошковой проволоки без учета порошка TiB_2 обеспечивал при ЭШН матрицу сплава типа 20Х7Г12Н2 с аустенитно-мартенситной структурой, обладающего высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания. В данном случае марганец является основным аустенизатором, определяющим структурно-фазовый состав матрицы сплава.

Электрошлаковую наплавку металла на экспериментальные образцы производили на установке А-1401 в токоподводящем кристаллизаторе с использованием флюса АНФ-6 и двухконтурной схе-

мы электропитания шлаковой ванны постоянным током (рис. 1) [4]. Данный способ обеспечивает поддержание устойчивого электрошлакового процесса при минимальном тепловыделении в шлаке вблизи электродной проволоки, что способствует снижению растворимости в нем TiB_2 . Наплавку выполняли с использованием порошковой проволоки, подаваемой в шлак в качестве электронейтральной присадки. Старт ЭШН осуществляли заливкой шлака в полость кристаллизатора. Наплавку слоя металла высотой 10 мм производили на торцы цилиндров из стали 20 диаметром 30 мм в следующем режиме: диапазоны токов с токоподводящей секции кристаллизатора и электродной проволоки составляли 110–130 и 90–110 А, а значения напряжения на шлаке между кристаллизатором и стальным образцом, а также между последним и электродной проволокой — 20–25 и 25–30 В соответственно.

Для металлографических исследований наплавленного металла использовали оптический микроскоп Axiovert 40 МАТ. Дюриметрический анализ проводили на приборах ТП-2 при нагрузке 1,47 кН и ПМТ-3 при 0,98 и 1,96 Н.

Испытания наплавленного металла на изнашивание закрепленным абразивом выполняли на экспериментальной установке — аналоге машины Х4-Б. Основные параметры испытаний: размеры образцов 3×3×10 мм; статическая нагрузка 936 МПа; путь трения 30 м; диаметр круга 340 мм; радиальная подача 3 мм/об; абразивная истирающая поверхность — шлифовальная шкурка зернистостью Р100 (по ГОСТ Р 52381-2005). Относительную износостойкость оценивали по формуле

$$\varepsilon = \Delta G_s / \Delta G_{и},$$

где ΔG_s — потеря массы эталона (сталь 45 в отожженном состоянии), г; $\Delta G_{и}$ — потеря массы испытуемого образца, г. Последнюю измеряли с точностью до 0,1 мг на аналитических весах ВСЛ-60/0,1А.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Металлографический анализ нетравленных микрошлифов показал, что наплавленный металл характеризуется отсутствием трещин, пор и шлаковых включений. В его структуре (рис. 2, а, б) наблюдаются равномерно распределенные включения округлой формы с микротвердостью 35 ГПа, что соответствует дибориду титана. Их размер варьируется от 2 до 25 мкм, причем с увеличением содержания TiB_2 в шихте порошковой проволоки с 8 до 28 мас.% сред-

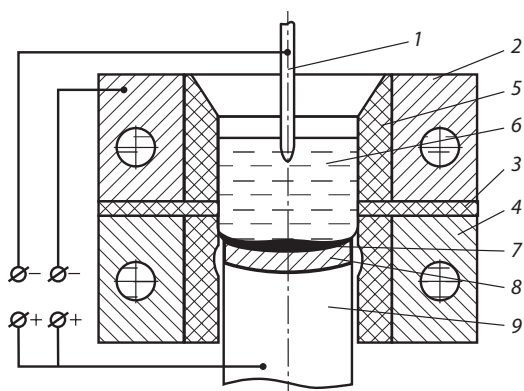


Рис. 1. Схема ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе

1 – электродная проволока, 2 – токоподводящая секция, 3 – изолятор, 4 – формирующая секция, 5 – графитовая футеровка, 6 – шлаковая ванна, 7 – сварочная ванна, 8 – наплавляемый металл, 9 – цилиндрический образец

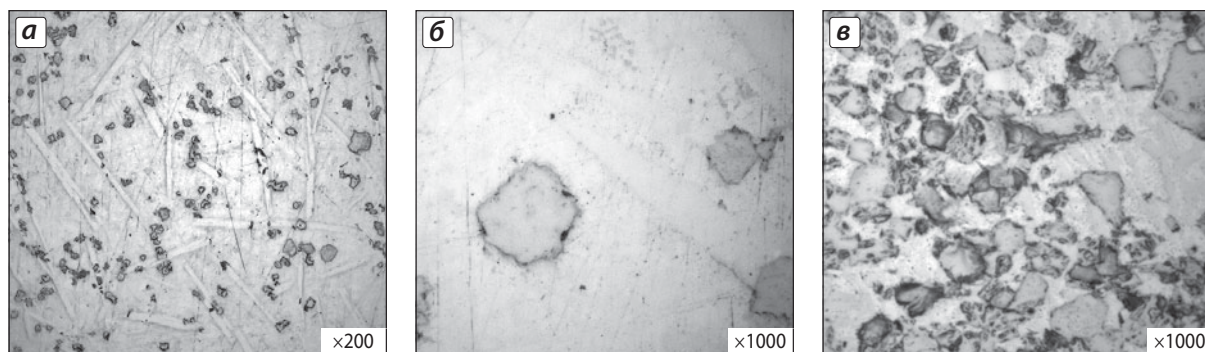


Рис. 2. Микроструктуры металла, наплавленного с использованием порошковой проволоки, содержащей в шихте 28 мас.% TiB_2 , в качестве электрода (**а**, **б**) и электронейтральной присадки (**в**)

ний размер возрастает с 3 до 14 мкм. Эти включения, величина и форма которых коррелируют с параметрами частиц исходного порошка TiB_2 , являются его оплавленными гранулами, перешедшими в наплавленный металл из порошковой проволоки. Косвенным подтверждением этого являются результаты ЭШН электронейтральной порошковой проволокой, при которой минимально необходимый для поддержания электрошлакового процесса уровень тепловыделения в шлаковой ванне обеспечивался действием токоподводящей секции кристаллизатора. Электронейтральную проволоку подавали в относительно холодную зону шлаковой ванны, что обусловило наличие в наплавленном металле скоплений частиц не расплавленной шихты (см. рис. 2, в), причем большинство из них состоит из тугоплавких гранул TiB_2 .

Условия нагрева и растворения тугоплавких микрочастиц TiB_2 , находящихся в порошковой проволоке, существенно отличаются от кинетики расплавления тугоплавких макрочастиц, введенных через свободную поверхность шлаковой ванны, описанной в работе [5]. При подаче в шлак порошковой проволоки расплавленный металл ее оболочки, к которому примешивается расплав шихты, формируется в капли, содержащие тугоплавкие гранулы TiB_2 . При этом нагрев частиц TiB_2 осуществляется преимущественно за счет конвективного теплообмена с металлом капель, температура которых близка к температуре шлака.

Установлено, что объемная доля гранул исходного порошка TiB_2 в наплавленном экспериментальными проволоками металле не превышает 6 %, вследствие того что значительная их часть диссоциирует и титан с бором попадают в металл капель, подвергающийся активной металлургической обработке шлаковым расплавом. Поскольку титан имеет высокое сродство к кислороду, то образующиеся

оксиды переходят в шлак. Бор, практически не растворяющийся в твердых растворах железа, может участвовать в образовании эвтектик, а также боридов Fe, Ni, Cr, Ti в соответствии с их концентрацией в металлическом расплаве и степенью боридообразующей способности этих элементов. Оставшиеся гранулы TiB_2 , частично оплаваясь, переходят в наплавленный металл, армируя его.

Поскольку температура шлака в области плавления электродной проволоки и остальном объеме шлаковой ванны в ходе эксперимента не превышала $2200\text{ }^\circ\text{C}$, а температура плавления диборида титана составляет $3193\text{ }^\circ\text{C}$, можно предположить, что определяющую роль в процессе диссоциации гранул TiB_2 играет электрохимическое растворение при их межфазном взаимодействии со шлаковым и металлическим расплавами. Наличие в составе шихты проволоки хрома, являющегося поверхностно-активным элементом, значительно снижает контактный угол смачивания частиц TiB_2 сталью и активизирует их взаимодействие, которое интенсифицируется с повышением степени перегрева металлических капель и увеличением удельной поверхности порошка TiB_2 , пропорциональной его дисперсности. Поэтому с целью снижения степени растворения тугоплавких гранул TiB_2 для производства порошковых проволок необходимо использовать порошок с дисперсностью 50–100 мкм.

Микроструктурный анализ шлифов, подвергнутых травлению в растворе $30\%\text{HNO}_3 + 70\%\text{HCl}$, показал, что структурный состав металла, наплавленного проволокой с разным количеством введенного порошка TiB_2 , существенно различается. Так, при содержании в ней 28 мас.% TiB_2 наблюдается заэвтектическая структура металла, в которой наряду с включениями округлой формы присутствуют избыточные выделения боридов и карборидов в виде крупных и мелких светлых игл (рис. 3, а). Эвтектика

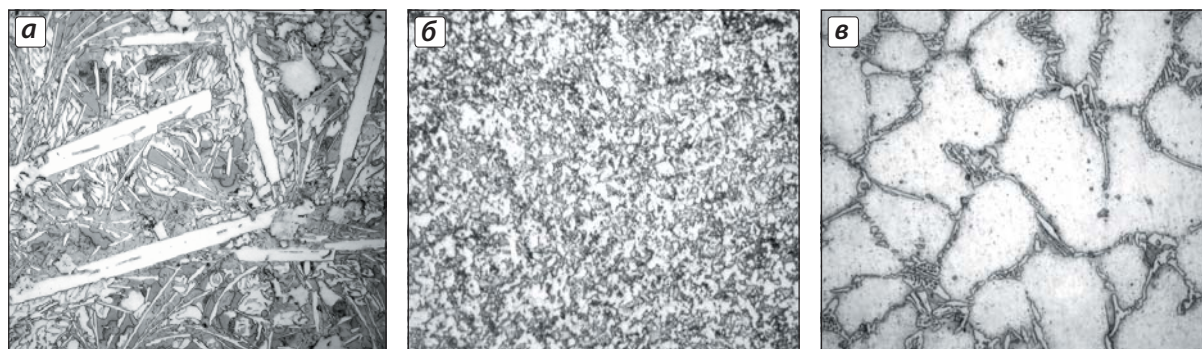


Рис. 3. Микроструктуры ($\times 500$) металла, наплавленного порошковой проволокой, содержащей в шихте TiB_2 , мас.%. 28 (а), 18 (б) и 8 (в)

характеризуется высокой микротвердостью, варьирующейся в пределах 12,0–15,5 ГПа. Твердость самых крупных игл в среднем достигает 14,6 ГПа, более мелких — 19,7 ГПа. Достаточно большая объемная доля упрочняющей твердой фазы (около 24 %) и высокая микротвердость матрицы предопределили повышенную твердость наплавленного металла, которая составила 58–61 HRC (рис. 4).

Снижение количества порошка TiB_2 в проволоке до 18 мас.% приводит к существенному изменению микроструктуры наплавленного металла (см. рис. 3, б). При этом эвтектика характеризуется значительной дисперсностью и пониженной микротвердостью (6,4–7,7 ГПа), крупные избыточные выделения твердой фазы отсутствуют, а твердость образцов составляет 45–48 HRC.

При уменьшении содержания TiB_2 в шихте порошковой проволоки до 8 мас.% структура наплавленного металла представляет собой зерна аустенита с микротвердостью 4–5 ГПа, окруженные раздробленной карбоборидной эвтектикой, небольшая объемная доля которой в совокупности с достаточно мягкой и пластичной аустенитной матрицей

определили невысокую (17–20 HRC) твердость полученных образцов.

Испытания на абразивное изнашивание показали (см. рис. 4), что наплавленный металл при содержании в проволоке 8 мас.% TiB_2 обладает низкой износостойкостью (ϵ). Пластичная аустенитная матрица, не претерпевающая мартенситного превращения, легко деформируется жестко закрепленными абразивными частицами. При этом тонкая сетка карбоборидной эвтектики не способна оказать существенного влияния на величину ϵ наплавленного металла. Увеличение количества TiB_2 в шихте проволоки до 18 мас.% повышает этот показатель незначительно. Преобладание мелкодисперсной эвтектики с невысокими значениями твердости и микротвердости, а также отсутствие крупных первичных выделений твердой фазы наряду с небольшим количеством гранул TiB_2 в структуре наплавленного металла не обеспечивают его достаточной стойкостью к абразивному изнашиванию. Металл, наплавленный проволокой с 28 мас.% TiB_2 , характеризуется повышенной износостойкостью. Высокая микротвердость и значительное количество упрочняющей твердой фазы, состоящей из гранул диборида титана и первичных выделений боридов и карбоборидов, обуславливают в сочетании с матричным сплавом достаточно высокие механические характеристики этого образца. Вместе с тем твердая матрица сплава препятствует надежному закреплению частиц боридов, которые склонны к выкрошиванию под действием абразива, что ухудшает износостойкость материала.

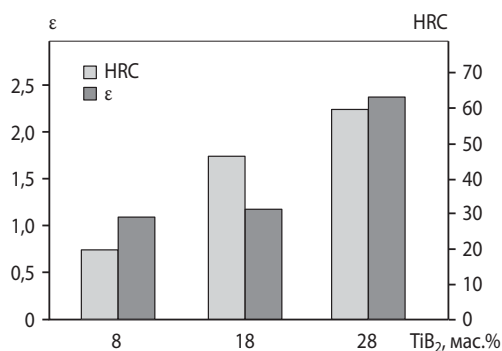


Рис. 4. Твердость и относительная износостойкость (эталон – сталь 45) наплавов в зависимости от содержания TiB_2 в шихте экспериментальных проволок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование композиционной структуры в процессе ЭШН порошковой проволокой, содержащей в составе шихты гранулы диборида титана, по-

звояет повысить износостойкость наплавленного металла. Улучшить этот показатель можно как за счет снижения содержания в металлическом расплаве бора, применяя порошок диборида титана с дисперсностью 50–100 мкм, так и путем повышения пластичности матрицы сплава, увеличивая содержание в ней углерода и никеля, расширяющих область существования γ -фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке госконтракта Минобрнауки № 16.740.11.0017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каковкин О.С., Дарахвелидзе Ю.Д., Старченко Г.Г. // Технология металлов. 2009. № 1. С. 33.
2. Орешкин В.Д. и др. // Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр. 2001. С. 47.
3. Гринберг А.Н., Арабей А.Б. // Сварочное пр-во. 1992. № 5. С. 7.
4. Соколов Г.Н., Михеев А.Н., Павлов А.А. // Там же. 2002. № 6. С. 31.
5. Веревкин В.И., Ростовцев А.Н., Сакун А.Ф. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2004. № 8. С. 39.

УДК 620.178.32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТИ ПОРОШКОВОГО СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДВУОСНОМ (РАСТЯЖЕНИЕ-КРУЧЕНИЕ) НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г. **А.В. Бабушкин, А.В. Гордеева**

Пермский государственный технический университет (ПГТУ)

А.В. Бабушкин – канд. техн. наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций ПГТУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). Тел.: (342) 239-10-01. Факс: (342) 239-12-24. E-mail: bav651@yandex.ru.

А.В. Гордеева – магистрант той же кафедры. E-mail: Asilisko@gmail.com.

Разработана методика экспериментальных исследований многоосной усталости порошкового материала при использовании оборудования и программного обеспечения фирмы «Instron» (США). Проведены испытания образцов порошкового структурно-неоднородного материала на основе технически чистого железа в условиях двuosного (растяжение-сжатие и кручение) синхронного циклического нагружения. Выполнен анализ их напряженно-деформированного состояния в зоне разрушения. По полученным экспериментальным результатам построены кривые усталости. Проведена сравнительная оценка экспериментальных данных с расчетными, в ходе которой получено удовлетворительное совпадение результатов.

Ключевые слова: усталость порошковых материалов, долговечность, кривая усталости, циклическое деформирование, напряженно-деформированное состояние.

The technique has been developed to study multiaxial fatigue of powdered material when using the equipment and the software of «Instron» (USA). The tests of powdered structurally-nonhomogeneous material on the basis of technically pure iron under the conditions of biaxial (tension-compression and twist) synchronous cyclic loading have been carried out. An analysis of their stress and strain state in the rupture zone is made. Using the obtained experimental results, fatigue curves are plotted. The experimental and design data are compared and the satisfactory coincidence of the results is obtained.

Key words: fatigue of powdered materials, service life, fatigue curve, strain cycling, stress and strain state.

Многие элементы реальных конструкций и деталей машин подвергаются действию усталостного нагружения. Экспериментальное исследование и расчет на усталость требуют больших материальных и временных затрат [1], но они обязательны при использовании перспективных порошковых материалов в ответственных конструкциях. Применение порошковых технологий в промышленности позволяет ввести в номенклатуру совершенно но-

вые материалы с уникальными свойствами. Однако проблемы оценки работы конструкций в реальных условиях — сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) и усталости — остаются нерешенными и особо актуальными для данного класса материалов.

Особенности конструкций, а также бесконечное число возможных реализаций структуры в структурно-неоднородных материалах даже при посто-