ВОПРОСЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.791.927.5 + 620.178.165

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-6-241-71-75

Д. В. Прияткин, А. А. Артемьев, П. В. Лойко, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКОГО НАПЛАВЛЕННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: nanomaterial-vstu@yandex.ru

Выполнены металлографические исследования микроструктуры экспериментального типа наплавленного сплава системы легирования Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb. Определен химический и гранулометрический состав упрочняющих металл фаз. Проведено испытание наплавленного металла на стойкость к газоабразивному изнашиванию при повышенной температуре. Выполнена диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии с получением изображений треков от индентора методом атомно-силовой микроскопии. Исследован характер микропластического деформирования изношенных поверхностных слоев сплава. Обсуждено влияние структурно-фазового состава и упрочняющих фаз в наплавленном металле на его износостойкость. Определены перспективные пути дальнейшего повышения стойкости экспериментального сплава к газоабразивному изнашиванию.

Ключевые слова: электродуговая наплавка, наплавленный металл, структура, высокотемпературный износ, газоабразивный износ, упрочняющие фазы, склерометрия, атомно-силовая микроскопия.

D. V. Priyatkin, A. A. Artem'ev, P. V. Loyko, G. N. Sokolov, V. I. Lysak

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT SURFACED ALLOY SYSTEM Fe – C – Cr – Ni – Mn – Mo – Ti – Nb

Volgograd State Technical University

Metallographic studies of the microstructure of the experimental type of the deposited alloy of the Fe - C - Cr - Ni - Mn - Mo - Ti - Nb alloying system were performed. The chemical and granulometric composition of the metal-strengthening phases has been determined. The weld metal was tested for resistance to gas-abrasive wear at elevated temperatures. The wear resistance of the deposited metal was diagnosed by sclerometry with obtaining images of tracks from the indenter using atomic force microscopy. The character of microplastic deformation of worn surface layers of the alloy is investigated. The influence of the structural phase composition and hardening phases in the deposited metal on its wear resistance is discussed. Promising ways to further increase the resistance of the experimental alloy to gas-abrasive wear are determined.

Keywords: arc surfacing, weld deposit, structure, high temperature wear, gas-abrasive wear, strengthening phase, sclerometry, atomic force microscopy.

Введение

В условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания работают многие детали энергетического, металлургического и другого оборудования (например, элементы засыпных аппаратов доменных печей, тягодутьевые машины газоочистных сооружений и тепловых

электростанций, оборудование пневмотранспорта, детали газовых турбин, работающих на твердом топливе, и др.).

Процесс разрушения поверхностных слоев материала при данном виде изнашивания происходит за счет срезания, выкрашивания, выбивания и многократного пластического дефор-

мирования поверхностных микрообъемов. Интенсивность изнашивания определяется скоростью, свойствами и формой абразивных частиц, температурой и степенью запыленности газового потока, физико-механическими свойствами изнашиваемого материала и рядом других факторов [1–2].

Известно [2], что на износостойкость материалов при газоабразивном изнашивании независимо от температуры влияет угол атаки газоабразивного потока: максимальный износ для пластичных материалов находится в диапазоне $20...30^\circ$, а для хрупких – около 90° . При этом, например, в роторах тягодутьевых машин наиболее вероятны углы атаки $25...35^\circ$ [3]. Изнашивание материала при этом происходит в основном за счет пластического оттеснения материала в направлении удара и микрорезания [4].

Обеспечить значительное повышение продолжительности периода эксплуатации оборудования в таких условиях возможно за счет упрочнения его рабочих поверхностей наплавкой износостойкими сплавами [5]. Для этой цели ведущие европейские и отечественные фирмы, такие как «Castolin» (Швейцария), «Buller», «Dugum» (Германия), «Welding Alloys» (Великобритания), АО «ПОЛЕМА» (Россия) и др., предлагают порошковые проволоки которые в основном обеспечивают получение износостойких сплавов типа высокохромистых чугунов с высокой (до 40%) степенью легирования при содержании углерода от 2 до 5 масс %, что делает данные материалы не только дорогостоящими, но и нетехнологичными в применении [6].

В данных условиях актуальна разработка экономнолегированного гетерофазного износостойкого сплава, обладающего упругой и пластичной матрицей, армированной твердыми фазами, с обеспечением прочной межфазной связи. В качестве матрицы такого сплава перспективно использовать аустенит, который можно получить в наплавленном металле в очень широком диапазоне содержания карбидообразующих элементов и углерода. Однако до настоящего времени не определен рациональный структурный состав аустенитных сплавов, обеспечивающий повышенную стойкость в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания при минимальном содержании дорогостоящих и дефицитных легирующих элементов [7].

Целью работы – изучение структуры и стойкости в условиях газоабразивного изнашивания

при температуре 600°C экспериментального типа наплавленного металла 120X14H6Г6МЗТ2Б2.

Материалы, методы исследований и эксперимент

Электродуговую наплавку сплава производили на постоянном токе обратной полярности с использованием сварочного автомата ESAB A2S Mini Master. В качестве электродной использовали экспериментальную порошковую проволоку диаметром 2,8 мм, обеспечивающую химический состав наплавленного металла: 1,1...1,2 % C; 13,5...15 % Cr; 5,7...6,0 % Mn; 6,0...6,2 % Ni; 3,0...3,15 % Mo; 2,0...2,15 % Ti; 2,0...2,1 % Nb; остальное Fe. Наплавку в среде аргона выполняли на пластины из стали Ст3сп размером $200 \times 150 \times 12$ мм. Режим наплавки: сила тока 280 А; напряжение на дуге 25 В; скорость наплавки 24 см/мин; расход защитного газа 15 л/мин.

Химический состав наплавленного металла определяли оптико-эмиссионным анализатором PMI Maser Pro. Твердость металла измеряли по методу Роквелла с использованием твердомера ТН-500.

Испытания на газоабразивное изнашивание в потоке разогретого газа, несущего в себе абразивные частицы кварцевого песка размером $40...250$ мкм, проводили по методике, изложенной в работе [8]. Температура испытаний составляла 600°C , давление подачи газоабразивного потока 3 атм, угол атаки поверхности образца 30° ; длительность испытания 120 с. Температуру поверхности образца контролировали термопарой BP5/20, подключенной к аналого-цифровому преобразователю ЛА-20 USB, обеспечивающему вывод показаний на экран персонального компьютера.

Диагностику износостойкости сплава методом склерометрии выполняли согласно методике, представленной в работе [9]. Скрайбирование поверхности наплавленного металла производили при нормальной температуре алмазным индентором Виккерса при его движении ребром вперед. Величина нагрузки составляла 0,5 Н, скорость перемещения $2...3$ мм/с. Топографию треков на поверхности образцов получали в режиме полуконтактной атомно-силовой микроскопии с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver Pro. Использование для получения изображения трека атомно-силовой микроскопии позволило изучить процессы пластической деформации металла на микроуровне.

Микроструктуру наплавленного металла изучали с использованием оптической (микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии. Количественный анализ структурных составляющих в наплавленном металле выполняли по фотографиям в программе ImageJ. Содержание легирующих элементов в структурных составляющих наплавленного сплава определяли микрорентгеноспектральным анализом.

Результаты и их обсуждение

Выполненные методами оптической и электронной микроскопии металлографические исследования наплавленного металла показали (рис. 1), что его структура эвтектическая с дисперсными упрочняющими фазами, равномерно распределенными по всему объему металла. Твердость металла 34 HRC.

Микрорентгеноспектральный анализ упрочняющих фаз показал, что легирование на-

Рис. 1. Микроструктура наплавленного металла: оптическое (а) и СЭМ (б) изображение

плавленного металла углеродом, а также карбидообразующими элементами – ниобием, титаном, молибденом и хромом – способствует формированию карбидов MoC , $(\text{Ti,Nb,Mo})_x\text{C}_y$ и $(\text{Fe,Cr,Mo})_x\text{C}_y$. Карбиды MoC имеют размер 150...800 нм и их количество в наплавленном металле небольшое. Объемная доля комплексных карбидов $(\text{Ti,Nb,Mo})_x\text{C}_y$ неправильной формы размером 1...3 мкм значительно выше. Проведенный по фотографиям микрошлифов гранулометрический анализ данных карбидов позволил установить, что их средний размер

составляет 2,3 мкм при объемной доле в наплавленном металле 12 %.

Визуальная идентификация эвтектических карбидов $(\text{Fe,Cr,Mo})_x\text{C}_y$ затруднена, поэтому при анализе их не учитывали. Вместе с тем, несмотря на их относительно низкие механические свойства по сравнению с карбидами MoC и $(\text{Ti,Nb,Mo})_x\text{C}_y$, они также вносят вклад в упрочнение матрицы наплавленного металла.

Показано (рис. 2), что характер распределения карбидов $(\text{Ti,Nb,Mo})_x\text{C}_y$ и MoC по размерам носит экспоненциальный характер – значи-

Рис. 2. Гистограмма распределения карбидов MoC и $(\text{Ti,Nb,Mo})_x\text{C}_y$ по размерам

тельно преобладает количество мелких фаз размером до 2 мкм, при этом крупных частиц размером более 5 мкм в наплавленном металле практически не формируется.

Прогноз структурно-фазового состава легированного большим количеством аустенизаторов металла 120X14H6Г6МЗТ2Б2, выполненный по диаграмме, предложенной Данильченко Б. В. [10], показал, что твердый раствор, входящий в состав эвтектики, состоит из γ -Fe. Повышенная пластичность и достаточно высокая прочность легированного никелем, хромом и молибденом аустенита должны способство-

вать надежному закреплению упрочняющих фаз в матрице сплава.

Влияние дисперсных упрочняющих фаз на износостойкость наплавленного металла оценивали методом склерометрии при скрайбировании его поверхности алмазным индентором, имитирующим одиночную абразивную частицу. Исследование рельефа и профилограмм треков на поверхности наплавленного металла показало (рис. 3), что при движении индентора происходит интенсивная пластическая деформация материала, что обуславливает формирование по границам треков бугров.

Рис. 3. Топография скрайбированной поверхности наплавленного металла (а) и профилограмма в поперечном сечении трека (б):
 S_c – площадь смещенного в бугры деформации металла; S_b – площадь выдавленного индентором металла

Анализ объемов материала, выдавленного со дна трека и смещенного в бугры, показал, что эти объемы практически равны. Таким образом, можно предположить, что в данных условиях изнашивания энергия, передаваемая индентором поверхности, расходуется не на формирование микростружки, а накапливается в пластически деформированных объемах бугров и подповерхностном слое трека. Вместе с тем, в реальных условиях изнашивания при многократном воздействии абразивных частиц данные объемы металла после исчерпания запаса пластичности могут подвергаться интенсивному разрушению.

Выполненные испытания образцов наплавленного металла в условиях воздействия газоаб-

разивного потока при температуре 600 °С показали, что на изношенной поверхности формируются многочисленные лунки от ударов абразивных частиц, размеры которых существенно меньше размеров использованного абразива.

Выявлено, что интенсивная пластическая деформация наплавленного металла в процессе изнашивания локализуется в очень тонких (2,5...5 мкм) поверхностных слоях (рис. 4). Деформированный слой идентифицируется на сечениях поверхности изношенного образца металла при формировании изображения с использованием ионного луча. Показано, что структура металла данного слоя многократно измельчается по сравнению с исходной структурой.

Рис. 4. Сечение поверхностного слоя изношенного образца

Вывод

С целью повышения стойкости наплавленного сплава к газоабразивному изнашиванию необходимо увеличить в нем объемную долю упрочняющей фазы за счет увеличения содержания углерода и карбидообразующих элементов при соблюдении оптимального соотношения между ними, обеспечивающего формирование в наплавленном металле карбидов с наиболее высокими механическими характеристиками. Повышению износостойкости металла также должно способствовать более равномерное распределение упрочняющих фаз в его объеме, обеспечить которое возможно за счет применения обработки кристаллизующегося расплава сварочной ванны ультразвуковыми колебаниями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Терещенко, А. Ф.* Исследование струйного износа наплавленного металла / А. Ф. Терещенко, В. П. Шимановский, Ю. А. Юзвенко // Автоматическая сварка. – 1966. – № 11. – С. 32–35.
2. *Manish, R.* Elevated temperature erosive wear of metallic materials / R. Manish // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2006. – № 39. – P. 101–124.
3. *Брук, А. Д.* Дымососы газоочистных сооружений / А. Д. Брук. – Москва : Машиностроение, 1984. – 144 с.
4. *Баранов, М. Н.* Прочностные показатели обрабатываемого материала при струйно-абразивной обработке / М. Н. Баранов, М. Г. Исупов, Г. П. Исупов // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 62–65.
5. *Соколов, Г. Н.* Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 248 с.
6. *Ворончук, А. П.* Порошковые ленты для износостойкой наплавки / А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2014. – № 14. – С. 75–78.
7. *Брыков, М. Н.* Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании / М. Н. Брыков, В. Г. Ефременко, А. В. Ефременко. – Херсон : Гринь Д. С., 2014. – 364 с.
8. Методика испытаний наплавленного металла на газоабразивное изнашивание / А. А. Артемьев, Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, М. А. Рыков, А. В. Крутенко, М. В. Шниппо // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (213) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 112–116.
9. Диагностика износостойкости наплавленного металла методом склерометрии / Г. Н. Соколов, А. А. Артемьев, И. В. Зорин, В. И. Лысак, В. Б. Литвиненко-Арьков // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2 (март-апрель). – С. 34–39.
10. *Данильченко, Б. В.* Выбор износостойкого наплавленного металла для работы в условиях абразивного изнашивания / Б. В. Данильченко // Сварочное производство. – 1992. – № 5. – С. 31–33.