

ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Л. МАЛИНОВ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Приведены результаты исследований по разработке экономнолегированных наплавочных материалов, обеспечивающих повышение долговечности деталей машин за счет получения в структуре наплавленного металла метастабильного аустенита, претерпевающего деформационное упрочнение при эксплуатации.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковая лента, наплавленный металл, метастабильный аустенит, мартенсит, износостойкость, механические свойства, деформационное упрочнение

В настоящее время проблема ресурсосбережения является достаточно актуальной. Одним из перспективных направлений ее решения является создание и широкое внедрение в производство экономнолегированных электродных материалов с эффектом деформационного упрочнения наплавленного металла при эксплуатации, заключающегося в превращении метастабильного аустенита в мартенсит под воздействием внешней нагрузки.

Первые электродные материалы, обеспечившие получение в наплавленном металле метастабильного аустенита, созданы под руководством М. И. Разикова. Разработаны электроды УПИ 30X10Г10 и порошковая проволока ПП-30X11Г12Т [1]. Наряду с высокими эксплуатационными свойствами им присущ ряд недостатков, а именно: трудная обрабатываемость резанием наплавленного металла, а также его недостаточная коррозионная стойкость и сопротивление абразивному изнашиванию.

В данной работе обобщены результаты исследований по созданию более технологичных электродных материалов, в том числе, имеющих повышенную абразивную стойкость. Определены направления дальнейших исследований и показаны примеры технических решений, которые могут быть широко использованы в промышленности Украины для повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей машин.

В работе [2] приведены данные о порошковой ленте ПЛ-Нп-15X13АГ10МФС (ПЛН-4), которая показала высокую эффективность при наплавке деталей, работающих в условиях контактного нагружения. Она была применена при восстановлении крановых колес, плунжеров гидропрессов и цапф сталеразливочных ковшей. Наплавленный этой лентой металл имеет улучшенную обраба-

тываемость резанием, что достигнуто путем снижения содержания углерода и повышения стабильности аустенита по отношению к деформационному мартенситному превращению за счет увеличения степени легирования хромом и марганцем.

Показано, что термообработка, включающая низкотемпературный отжиг при 600...650 °С, обычно проводимая после наплавки для снятия внутренних напряжений, уменьшает стабильность аустенита к деформационному мартенситному превращению и за счет этого повышает износостойкость на 30...40 % при трении скольжения и качения [3].

Известно, что наиболее однородные свойства наплавленного металла удается получить при использовании электродной проволоки сплошного сечения. В связи с этим была разработана проволока Нп-14X14Г12Ф диаметром 4 мм [4]. Автором проведены исследования свойств металла, наплавленного этой проволокой под флюсами АН-348 и АН-26. Механические свойства наплавленного металла приведены в таблице.

Испытания на износ проводили в условиях сухого трения на машине МИ-1М по схеме колодка-ролик. Ролик диаметром 46 мм и толщиной 10 мм изготавливали из стали 50 твердостью *HV* 320. Испытуемые образцы наплавленного металла имели размеры 10×10×25 мм. Скорость вращения ролика составляла 425 об/мин, скорость скольжения — 0,98 м/с, нагрузка — 100 МПа. Эталонном служила отожженная сталь 50. Результаты определения относительной износостойкости после испытания в течение 15 мин представлены на рисунке. Для сравнения приведены также данные относительной износостойкости металла, наплавленного проволоками Св-08Г2С и Нп-30ХГСА под флюсом АН-348.

В металле, наплавленном проволокой Нп-14X14Г12Ф под флюсом АН-26, количество мартенсита в структуре увеличивалось примерно от

Механические свойства металла, наплавленного Нп-14Х14Г12Ф

Марка флюса	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Твердость <i>HВ</i>
АН-348	580	770	6,5	9,8	350
АН-26	330	680	14,5	22,0	260

5 (в состоянии после наплавки) до 60 % (на поверхности износа). При использовании флюса АН-348 после наплавки количество мартенсита было 30 %, а после износа оно возрастало до 70 %. Более высокая износостойкость наплавленного металла в первом случае объясняется оптимальной интенсивностью деформационного мартенситного превращения, обеспечивающего не только требуемое упрочнение поверхности, но и одновременную релаксацию напряжений, что позволяет большую долю внешнего воздействия расходовать на реализацию превращения, а не на разрушение.

На основании полученных данных сделан вывод о том, что использование для наплавки флюса АН-26 является более целесообразным, чем АН-348, так как обеспечивает более высокий уровень механических свойств (таблица) и износостойкости наплавленного металла, а также лучшую отделимость шлаковой корки.

В работе [5] приведены данные о наплавочной ленте ПЛН-6 (ПЛ-Нп-20Г15САФ), которая экономична по сравнению с рассмотренными выше материалами на Fe–Cr–Mn–C основе, а также обеспечивает получение в наплавленном металле структуры метастабильного аустенита. Сравнительные испытания в условиях трения качения и трения скольжения показали, что по износостойкости металл, наплавленный лентой ПЛН-6, так же, как и металл ПЛН-4 и Нп-14Х14Г12Ф значительно превосходит металл, наплавленный Св-30ХГСА. Лента ПЛН-6 показала высокую эффективность при наплавке крановых колес.

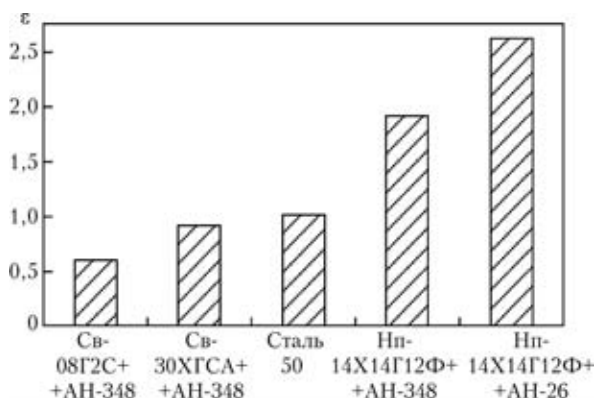
Важным направлением, позволяющим в полной мере реализовать преимущества структур с метастабильным аустенитом, является восстано-

вление и упрочнение деталей, подвергающихся износу в сочетании с сильными ударами. Такие условия работы характерны для трещ валков и муфт прокатных станов, крестовин железнодорожных и трамвайных путей, деталей автосцепки железнодорожных вагонов, молотков, ковшей драг, зубьев землеройных машин и др.

Наиболее широко для работы в этих условиях применяются литые детали из стали 110Г13Л. Повышенная износостойкость стали 110Г13Л реализуется при больших статических и динамических нагрузках, вызывающих ее сильный наклеп, но при отсутствии такого нагружения поверхностный слой деталей не упрочняется и изнашивается абразивом подобно углеродистой стали.

Обычно наплавка выполняется для ремонта изношенных литых деталей, что позволяет продлить срок их службы. Однако получение наплавленного металла, соответствующего по составу стали 110Г13Л, связано с серьезными технологическими трудностями, так как она склонна к охрупчиванию при перегреве и медленном охлаждении. Эффективным приемом, позволяющим повысить трещиностойкость наплавленного металла, является уменьшение в нем содержания углерода. Сохранение высокой износостойкости при этом обеспечивается за счет реализации деформационного мартенситного превращения при оптимальной интенсивности его развития. С учетом этого предложена наплавочная проволока 70Г7Х4Н2М [6]. При ее использовании аустенит, получаемый в структуре наплавленного металла, является метастабильным. Исследование рентгенографическим методом изношенной поверхности показало, что в исходной аустенитной структуре образуется до 20 % мартенсита деформации. Использование проволоки 70Г7Х4Н2М для электрошлаковой наплавки черпаков драг обеспечило повышение их долговечности на 20 % по сравнению со сталью 110Г13Л.

Высокую износостойкость в условиях контактно-ударного нагружения можно обеспечить и при использовании порошковой проволоки ПП-30Х8Г8СТ [7]. В структуре наплавленного металла наряду с аустенитом содержится 20...30 % мартенсита. Внедрение данной проволоки на Каменск-Уральском заводе ОЦМ показало, что долговечность наплавленных деталей шпинделей прокатных станов, роликов правильных машин, крестовин трамвайных путей и др. увеличилась в 2...7 раз.



Относительная износостойкость наплавленного металла ϵ по сравнению со сталью 50

Для работы в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания обычно применяются электродные материалы, обеспечивающие получение в структуре наплавленного слоя значительного количества твердых фаз (карбидов, боридов и др.). Однако их присутствие, хотя и является необходимым, но недостаточным условием высокой износостойкости. Увеличение их количества сверх оптимального для данных условий изнашивания приводит к охрупчиванию и быстрому разрушению рабочей поверхности. При этом важную роль играет структура металлической матрицы сплавов, в частности присутствие остаточного аустенита. В литературе приводятся противоречивые данные относительно его оптимального содержания. Одной из причин этого является то, что в большинстве случаев при разработке износостойких сплавов используется лишь качественная оценка условий, в которых они эксплуатируются. Это затрудняет рациональный выбор наплавочного материала для конкретных условий работы. В работе [8] предложено для характеристики различных условий изнашивания использовать коэффициент динамичности K_d , определяемый как отношение твердости образца из стали 110Г13Л после изнашивания в данных условиях к его исходной твердости. Сталь 110Г13Л накапливает энергию внешнего воздействия, упрочняясь при этом, а уровень ее упрочнения позволяет судить об интегральной интенсивности ударно-абразивного воздействия.

С учетом K_d проведено изучение абразивной и ударно-абразивной износостойкости наплавленного металла систем легирования Fe–Cr–Mn–C и Fe–Cr–Mn–V–C с различными соотношениями упрочняющих фаз и метастабильного аустенита в структуре [9]. Исследования выполняли методом планирования эксперимента для различных значений K_d в интервале от 1,2 до 3,5, что соответствует условиям испытаний, варьируемым от абразивного изнашивания практически без ударов, до изнашивания с очень интенсивной ударной нагрузкой. Содержание легирующих элементов в наплавленном металле изменялось в следующих пределах: 1...3 % C, 6...12 % Cr, 2...6 % Mn. Изучались также свойства наплавленного металла, дополнительно легированного ванадием в количестве примерно 3 %. В результате получены регрессионные зависимости ударно-абразивной износостойкости ϵ от химического состава наплавленного металла:

$$\epsilon_{(K_d=1,2)} = 0,98 + 0,68C + 0,087Mn - 0,027Cr + 0,021C \cdot Cr - 0,2C^2 - 0,017Mn^2, \quad (1)$$

$$\epsilon_{(K_d=1,4)} = 0,93 + 0,6C + 0,11Mn - 0,018Cr + 0,017C \cdot Cr - 0,18C^2 - 0,019Mn^2, \quad (2)$$

$$\epsilon_{(K_d=1,7)} = 1,17 + 0,41C + 0,044Mn - 0,018Cr + 0,017C \cdot Cr + 0,025C \cdot Mn - 0,16C^2 - 0,015Mn^2, \quad (3)$$

$$\epsilon_{(K_d=2,0)} = 1,19 + 0,36C + 0,023Mn - 0,015Cr + 0,017C \cdot Cr + 0,037C \cdot Mn - 0,18C^2 - 0,012Mn^2, \quad (4)$$

$$\epsilon_{(K_d=3,5)} = 0,77 + 0,866C + 0,002Mn - 0,014Cr + 0,031C \cdot Mn + 0,01Cr \cdot Mn - 0,34C^2 - 0,017Mn^2. \quad (5)$$

При малых коэффициентах динамичности ($K_d = 1,2 \dots 1,4$) наибольшая износостойкость получена в наплавленном металле следующего химического состава, %: 2...2,5 C, ~12 Cr, 2...3 Mn. Его твердость составляла *HRC* 45...50. Структура наплавленного металла преимущественно мартенситно-карбидная, количество остаточного аустенита составляет 25...30 %. В данных условиях ударно-абразивного воздействия легирование наплавленного металла ванадием в количестве до 3 % при одновременном увеличении содержания углерода до 2,5...3,0 % повышает износостойкость на 10...15 %. С увеличением интенсивности ударно-абразивного воздействия и соответственно ростом K_d в наплавленном металле следует уменьшать содержание углерода и увеличивать количество марганца. Так, при $K_d = 3,5$ оптимальным является следующее содержание легирующих элементов: 1,0...1,7 % C, 5...6 % Mn, ~ 12 % Cr. Твердость наплавленного металла около *HRC* 40. Структура преимущественно аустенитная при суммарном количестве мартенсита и карбидов в структуре менее 40 %. В данных условиях ударно-абразивного воздействия легирование ванадием неэффективно, поскольку не обеспечивает увеличения износостойкости.

Для различных вариантов интенсивности ударно-абразивного изнашивания, характеризуемых K_d , разработаны следующие порошковые ленты: ПЛ-Нп-230X12Г2 и ПЛ-Нп-250X10Г4Ф3 при $K_d = 1,2 \dots 1,4$; ПЛ-Нп-200X12Г2 при $K_d = 1,7 \dots 2,0$; ПЛ-Нп-160X12Г5 и ПЛ-Нп-100X6Г4 при $K_d = 3,5$, а также ПЛ-Нп-200X12Г5 для более широкого диапазона $K_d = 1,4 \dots 3,5$. Наплавку разработанными порошковыми лентами сечением 18×4 мм проводят под флюсом АН-26 на следующих режимах: сила тока $I = 600 \dots 700$ А, напряжение $U = 28 \dots 32$ В, скорость наплавки $v = 35 \dots 40$ м/ч. Указанные ленты обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами.

Порошковая лента ПЛ-Нп-160X12Г5 прошла промышленное опробование и была внедрена для восстановления плит щековых дробилок, что позволило повысить долговечность деталей в 1,5 раза по сравнению с изготовленными из стали 110Г13Л [9].

После наплавки структура и фазовый состав могут отличаться от оптимальных (в частности,

для обеспечения технологичности). В этом случае эффективным способом их регулирования является нормализация, а ее режимы должны выбираться с учетом интенсивности ударно-абразивного воздействия K_d . Изучено влияние температуры нагрева при нормализации, которая варьировалась от 800 до 1100 °С (время выдержки 20 мин), на свойства металла, наплавленного порошковыми лентами ПЛ-Нп-200Х12Г5 и ПЛ-Нп-250Х10Г4Ф3. Установлено, что с увеличением интенсивности ударно-абразивного воздействия и соответственно K_d необходимо использовать более высокие температуры нагрева при нормализации с целью увеличения количества аустенита в структуре, а также степени его стабильности, за счет дополнительного легирования при росте части карбидов. В условиях абразивного изнашивания с малой интенсивностью ударного воздействия ($K_d = 1,2...1,4$) повышение износостойкости наплавленного металла обеспечивает нормализация с сравнительно невысоких температур (~800 °С). Получаемая при этом структура является преимущественно мартенситно-карбидной, а количество аустенита составляет 20...30 %. Наплавленный металл, содержащий ванадий, при изнашивании в этих условиях имеет более высокую (15...20 %) износостойкость. При большой интенсивности ударного воздействия $K_d = 2,0...3,5$ наиболее высокую износостойкость обеспечивает нормализация с высоких температур (~1100 °С). При этом в структуре преобладает аустенит (> 70 %), который имеет повышенную стабильность по отношению к деформационному мартенситному превращению. С увеличением количества мартенсита и карбидов в структуре при данных условиях испытаний износостойкость снижается. При $K_d = 3,5$ после нормализации металл, наплавленный порошковыми лентами ПЛ-Нп-250Х10Г4Ф3, имеет примерно такую же ударно-абразивную износостойкость, как наплавленный ПЛ-Нп-200Х12Г5, не содержащий ванадий [9].

При наплавке высокоуглеродистых износостойких сплавов обычно имеет место образование трещин. Эффективным технологическим приемом, позволяющим избежать этого, и вместе с тем получить метастабильный аустенит с различным количеством упрочняющих фаз в наплавленном металле, является наплавка низкоуглеродистыми легированными сплавами с последующей химико-термической обработкой и термической обработкой [10]. Использование этого приема позволяет избежать образования трещин, а обработ-

кой получить в структуре наплавленного металла метастабильный аустенит и реализовать эффект деформационного упрочнения при эксплуатации.

При абразивном изнашивании наплавленного металла типа 30Х10Г10 наибольшая износостойкость получена после цементации и закалки с 1000 °С. Этому соответствовало получение в структуре наряду с мартенситом и карбидами метастабильного аустенита (>50 %), интенсивно превращающегося в мартенсит под воздействием абразивных частиц. При этом прирост мартенсита деформации составлял около 40 %. Положительный эффект в увеличении износостойкости оказывает и динамическое старение с выделением карбидов на изнашиваемой поверхности.

Большой интерес представляют наплавочные материалы, в которых при высокоотпуске, проводимом после наплавки для уменьшения напряжений, происходит дисперсионное твердение аустенита и его дестабилизация, активизирующая деформационное мартенситное превращение.

1. Разиков М. И., Мельниченко С. Л., Ильин В. П. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30Х10Г10. — М.: НИИМАШ, 1964. — 35 с.
2. Износостойкость дисперсионно-твердеющих сталей с нестабильным аустенитом / Л. С. Малинов, В. И. Конопляшко, В. Д. Панин и др. // Тез докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. «Прогрессивные методы сварки в тяжелом машиностроении и наплавки в черной металлургии». — Жданов: Жданов. металлург. ин-т, 1977. — С. 22–24.
3. Малинов Л. С., Малинов В. Л. Марганецсодержащие наплавочные материалы // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 34–37.
4. Пат. 23408А Україна, МКІ С 22 С 38/38. Склад дроту для зносостійкої наплавки та ін. / Л. С. Малинов, В. М. Полещук, Д. О. Деркач. — Заявл. 12.07.96; Оpubл. 02.05.98, Бюл. № 2.
5. Новый наплавочный материал системы С-Fe-Mn-V для повышения долговечности ходовых колес мостовых кранов / Л. С. Малинов, Е. Я. Харланова, А. А. Колечко и др. // Свароч. пр-во. — 1988. — № 9. — С. 18–20.
6. Высокомарганцовистая сталь для электрошлаковой наплавки / В. П. Пономаренко, А. Я. Шварцер, В. Н. Малько и др. // Металловедение и терм. обработка металлов. — 1982. — № 10. — С. 57–60.
7. Разиков Н. И., Кулешенко Б. А. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационно-ударном нагружении // Свароч. пр-во. — 1967. — № 7. — С. 10–12.
8. Петров И. В. Исследование износостойкости наплавочных материалов при абразивном износе и динамических нагрузках: Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1965. — 152 с.
9. Малинов В. Л. Разработка экономнолегированных наплавочных материалов для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания: Дис. ... канд. техн. наук. — Мариуполь, 2000. — 135 с.
10. Пат. 63462 А Україна, С 21 Д 1/2. Спосіб зміцнення / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. — Заявл. 22.04.2003; Оpubл. 15.01.2004, Бюл. № 1.

The paper gives the results of investigations on development of sparsely-alloyed surfacing consumables ensuring an increase of the fatigue life of machine parts by producing in the deposited metal structure a metastable austenite which undergoes deformation hardening in operation.

Поступила в редакцию 05.06.2006