

2. **Вознесенский, В.А.** Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 264 с.

УДК 621.791.92

А.В. СТЕФАНОВИЧ (БНТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПРОВОЛОКИ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Введение. Для повышения износостойкости и реставрации деталей машин и инструмента широко используются покрытия, которые получают различными способами наплавки. В зависимости от условий эксплуатации к наплавленным покрытиям предъявляются различные требования. При непрерывном гальваническом осаждении металлов на проволочную заготовку для передачи постоянного тока используются скользящие катодные контакты, которые работают в условиях непрерывного скольжения проволоки по контактной поверхности в щелочных и кислых растворах. Условия эксплуатации предъявляют определенные требования к материалу катодных скользящих контактов по высокой износостойкости и коррозионной стойкости. Обязательным условием является отсутствие искрообразования в зоне контакта катодных контактов и проволочной заготовки, т.к. искрообразование создает на поверхности проволоки микронеровности. В дальнейшем в процессе волочения проволоки на микронеровностях гальваническое покрытие нарушает сплошность, что является браком. В настоящее время для изготовления катодных скользящих контактов используется коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т аустенитного класса, химический состав которой обеспечивает высокую коррозионную стойкость за счет легирования хромом 17–19 %, отсутствие в структуре феррита, способству-

ющего искрообразование в зоне контакта, образованию деформационно стабильного аустенита, который не испытывает превращения в мартенсит при микропластической деформации в зоне контакта и не приводит к образованию искр, а также удовлетворительную электропроводность (удельное электросопротивление – 72,5 мкОм·см). Однако низкая твердость стали 12Х18Н10Т (1700–1900 МПа) обуславливает высокий износ катодных контактов, что требует их частой реставрации и замены.

Целью работы является разработка специальных наплавочных материалов, обеспечивающих повышение срока эксплуатации скользящих катодных контактов. Реализация поставленной цели достигается путем наплавки аргонодуговой сваркой специально разработанного присадочного материала на контактную поверхность. Присадочный материал представляет собой проволоку из нержавеющей стали, подвергнутой диффузионному насыщению углеродом, азотом, бором. В процессе наплавки диффузионный слой взаимодействует с основой и образуется наплавленный слой, имеющий гетерогенную структуру, которая состоит из твердых частиц карбидов, боридов, нитридов, находящихся в аустенитной матрице. Твердые частицы (14000–16000 МПа) повышают износостойкость и не ухудшают электропроводность (удельное электросопротивление находится на уровне стали 12Х18Н10Т 31–107 мкОм·см) [1]. Аустенитная матрица является деформационно-стабильной за счет дополнительного легирования азотом [2] и не образует искр в зоне электрического контакта.

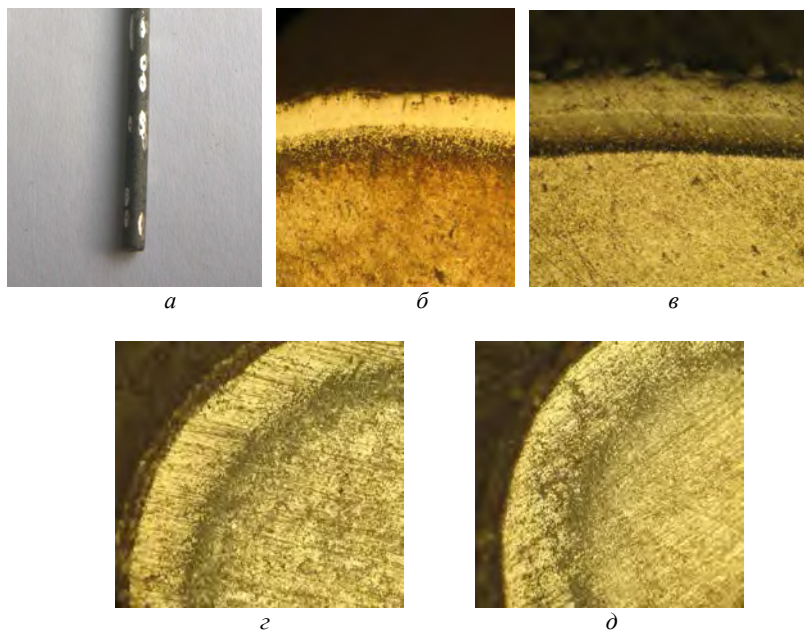
Методика исследований. В качестве исходного материала использовали проволоку из стали 06Х18Н9Т диаметром 2,0 мм, которую подвергали химико-термической обработке. Химико-термическую обработку проводили в твердом карбюризаторе в металлических контейнерах с плавким затвором. Использовали следующие процессы химико-термической обработки: высоко- и низкотемпературную нитроцементацию, борирование и сочетание данных процессов. Нитроцементацию проводили при температурах 550, 600, 860, 950 °С в течение 1–6 ч в смесях на основе древесного

угля, азотосодержащих солей и активатора. Насыщение при температуре 550 и 600 °С обеспечивает преимущественное насыщение азотом, а высокотемпературная нитроцементация при температурах 860 и 950 °С обеспечивает преимущественное насыщение углеродом. Насыщение бором осуществляли при температурах 900, 950, 1050 °С в течение 1–6 ч. Для двухфазного борирования использовали смесь на основе технического карбида бора с добавлением активатора, для однофазного борирования – порошковую смесь «Besto-1». Комплексное насыщение азотом и бором проводили ступенчато: при 550 °С в течение 1 и 2-х ч – азотом; при 950 °С и времени выдержки 4 ч – бором.

Металлографический анализ выполняли с использованием оптического микроскопа при увеличениях 500, 1000. Твердость структурных составляющих определялась на ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводился на ДРОН-3 с медным излучением, при расшифровке рентгенограмм использовался каталог Power diffraction file Compiled by the JCPDS.

Наплавку осуществляли аргонодуговой сваркой током 70–90 А. Покрытие формировалось в два слоя: первый толщиной 0,5–1,5 мм, второй 2–3 мм.

Результаты исследований и их обсуждение. Толщина диффузионного слоя на проволоке диаметром 2 мм колеблется в пределах от 28 до 86 мкм в зависимости от температурно-временных параметров химико-термической обработки. Из-за небольшого диаметра проволоки и значительных внутренних напряжений в боридном слое происходит скалывание высокобористой фазы с внешней поверхности диффузионного слоя, которое может достигать до 50 % (рисунок 1, *а*). При этом толщина слоя в месте скалывания уменьшается на 60–70 %. Использование проволоки со сколотым боридным слоем при наплавке обеспечит меньшее легирование бором наплавленного покрытия. Степень скалывания зависит от толщины слоя и температуры насыщения. В результате исследований установлено, что при двухфазном борировании при 950 °С и времени выдержки 4 ч формируется нескалывающийся слой толщиной 70–80 мкм (рисунок 1, *б*).



a – поверхность борированной проволоки при 1000 °С, $\tau = 4$ ч;
б – микроструктура боридного слоя; *в, г, д* – нитроцементованные диффузионные
слои при насыщении 600 °С (*в*) $\times 1000$; 860 °С (*г*); 950 °С (*д*) $\times 500$

Рисунок 1 – Структуры диффузионных слоев, полученных при насыщении
бором (*a, б*) и азотом и углеродом (*в, г, д*)

Аналогичные исследования были выполнены и для однофазного борирования. Установлено, что нескальвающиеся однофазные слои толщиной 80–90 мкм формируются при насыщении 950 °С в течение 6 ч.

Ожидаемую структуру наплавленного покрытия, получаемого при наплавке проволоки с диффузионным слоем, можно оценить, используя результаты работы [3]. Количество эвтектики в наплавленном слое зависит от содержания бора в диффузионном слое и его толщины. В двухфазном боридном слое на коррозионностойкой аустенитной стали содержание высокобористой фазы FeB составляет 60–70 % и среднее количество бора в диффузионном слое составляет ≈ 12 –14 %, а в однофазном боридном слое – 8,8 % [4]. По-

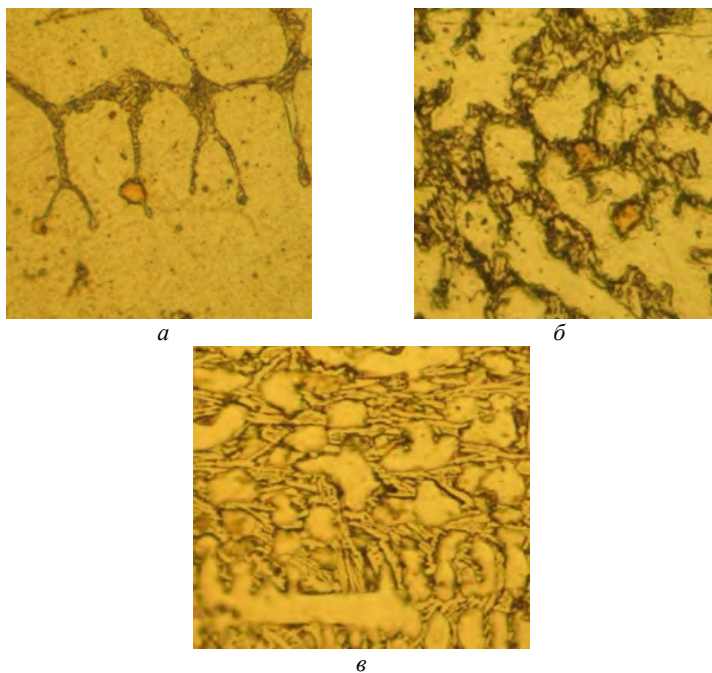
этому при наплавке проволоки с максимальной толщиной нескальвающегося двухфазного боридного слоя 70–80 мкм можно получить структуру наплавленного покрытия, содержащего до 50 % эвтектики. При наплавке проволоки с однофазным боридным слоем максимальное содержание эвтектики составит 30–35 %. Таким образом, процесс однофазного борирования обеспечивает меньшее содержание твердых частиц в наплавленном покрытии.

Исследование кинетики формирования диффузионных слоев при низкотемпературной нитроцементации показало, что при 600 °С и выдержке 6 ч формируются диффузионные слои толщиной менее 70 мкм. Микроструктура слоя (рисунок 1, в) состоит из темнотравящейся зоны с твердостью 10500–11500 МПа и представляет собой азотистый твердый раствор и выделения нитридов легирующих элементов [5].

Повышение температуры химико-термической обработки интенсифицирует процесс насыщения. Так при температуре 860 °С и выдержке 1 ч толщина диффузионного слоя составляет 154 мкм, при выдержке 4 ч толщина нитроцементованного слоя составляет 292 мкм. При температуре насыщения 950 °С формируются диффузионные слои толщиной от 248 до 560 мкм в зависимости от времени выдержки. Микроструктура диффузионных слоев, полученных при температуре насыщения 860–950 °С, по строению не отличается друг от друга (рисунок 1, г, д) и состоит из трех зон: внешней – темной, толщина которой составляет 25–80 мкм; средней – светлой, толщиной 80–210 мкм; внутренней – сильно травящейся зоны, толщиной 30–180 мкм. Толщины зон определяются температурно-временными параметрами химико-термической обработки. Микро-твердость зон нитроцементованного слоя составляет: для внешней 5420–6180 МПа, для средней – 5360–5720 МПа; для внутренней – твердость плавно снижается от 4880 МПа до твердости сердцевины (2030 МПа). Диффузионные слои, полученные при насыщении азотом и углеродом, не скальваются с поверхности проволоки при всех температурно-временных параметрах химико-термической обработки.

Микроструктуры наплавленных покрытий, полученных из проволоки 06Х19Н9Т, подвергнутой предварительному азотированию при 550 °С и выдержке 2 ч и последующему двухфазному бориро-

ванию при температуре насыщения 950 °С и времени выдержки 1, 2 и 4 ч, представлены на рисунке 2. Микроструктура наплавленных покрытий имеет доэвтектическое строение. Первичные дендриты представляют собой твердый раствор легирующих элементов в хромоникелевом аустените. По объему зерен видны включения нитридов квадратной и прямоугольной формы розового цвета. Эвтектика располагается по границам дендритов и ее количество зависит от толщины двухфазного боридного слоя.



а – азотом ($t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$) и бором ($t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$); *б* – $\tau = 2\text{ ч}$; *в* – $\tau = 4\text{ ч}$

Рисунок 2 – Микроструктура наплавленных покрытий, полученных из проволоки 06X19H9T, подвергнутой насыщению, $\times 1000$

При толщине боридного слоя 30–35 мкм ($t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 1\text{ ч}$), количество эвтектики составляет 10–15 %; при толщине 40–45 мкм ($t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$) – 20–30 %; 70–75 мкм ($t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$) – 50–60 % (рисунок 2).

Значения микротвердости структурных составляющих наплавленных покрытий зависят от температурно-временных параметров химико-термической обработки. Микротвердость дендритов зависит от времени предварительного азотирования. Увеличение времени азотирования с 1 до 2 ч повышает твердость на 450–560 МПа, и составляет 2300–2500 МПа при азотировании 1 ч и 2860–3410 МПа при времени азотирования 2 ч. Микротвердость эвтектики колеблется в широких пределах и зависит от времени борирования. При борировании проволоки в течении 2 ч, микротвердость составляет 4580 МПа, а при борировании 4 ч – 5800 МПа (рисунок 3).

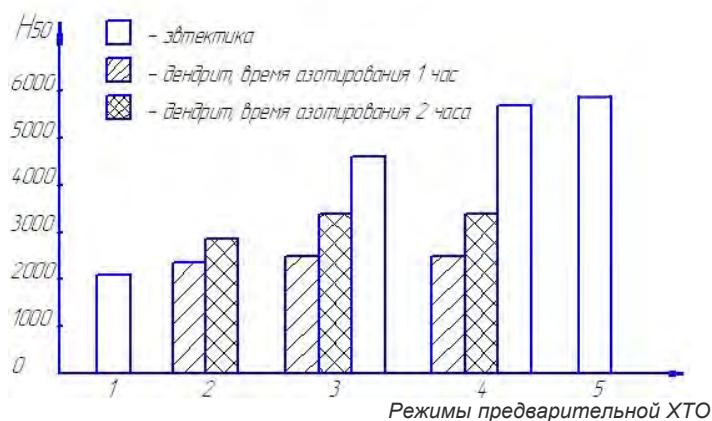
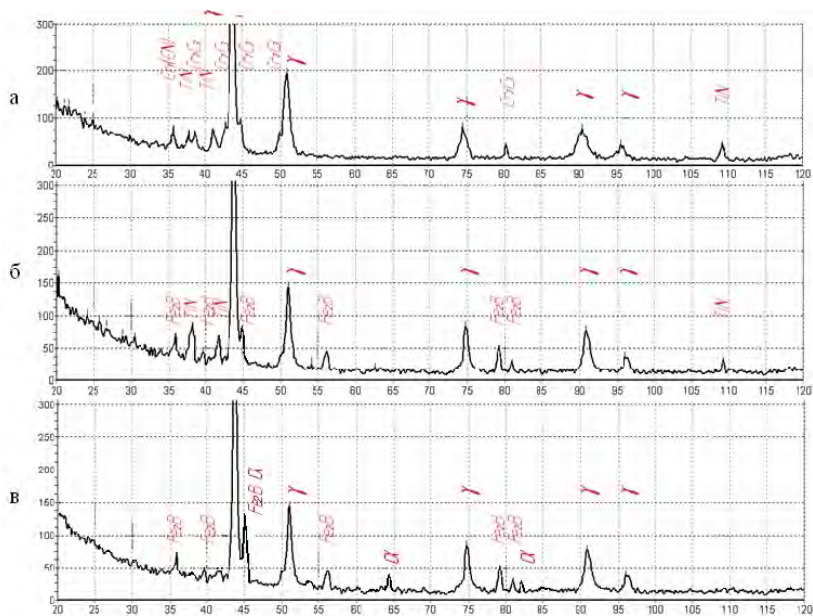


Рисунок 3 – Микротвердость структурных составляющих наплавленного слоя в зависимости от режимов предварительной химико-термической обработки проволоки из стали 06X19H9T: основа – сталь 12X18H10T (1), азотированная при 550 °С + борирование 950 °С, $\tau = 1$ ч (2); 2ч (3); 3ч (4); 4ч (5)

Рентгеноструктурный фазовый анализ наплавленных покрытий определил следующие фазы: нитроцементованной стали 06X19H9T – $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$, аустенит, TiN , Cr_7C_3 (рисунок 4, а), при наплавке борированной проволоки – $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$, аустенит, Fe_2B и следы α -фазы (рисунок 4, в); при наплавке проволоки подвергнутой азотированию и последующему борированию – $\text{Cr}_{0,19}\text{Fe}_{0,7}\text{Ni}_{0,11}$, аустенит, Fe_2B , TiN (рисунок 4, б).



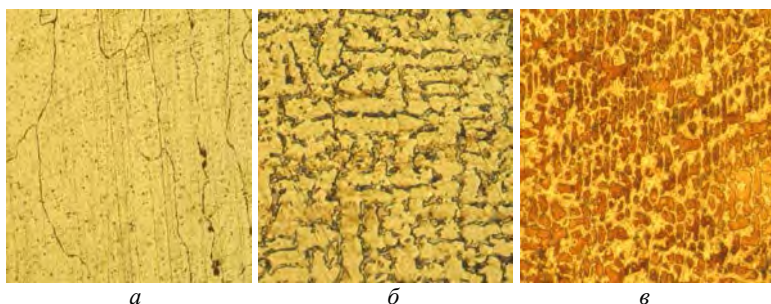
а – нитроцементация при $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$; *б* – борирование при $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$; *в* – азотирование при $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$ + борирование при $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 4\text{ ч}$

Рисунок 4 – Рентгенограммы наплавленных покрытий, полученных из проволоки 06Х19Н9Т, подвергнутой ХТО

Микроструктуры наплавленных покрытий, полученных из предварительно нитроцементованной стали 06Х19Н9Т, представлены на рисунке 5. Микроструктура наплавленного покрытия, полученного из проволоки, подвергнутой нитроцементации при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, представляет собой твердый раствор легирующих элементов в аустените (рисунок 5, *а*). Малая толщина нитроцементованного слоя ($\sim 70\text{ мкм}$) на проволоке не обеспечивает значительное легирование азотом и углеродом наплавленного покрытия и образование твердых частиц. Микротвердость составляет $2460\text{--}2540\text{ МПа}$, что несколько выше микротвердости основы.

Повышение температуры и времени нитроцементации увеличивает диффузионный слой на проволоке, что обеспечивает увеличение количества углерода и азота в наплавленном покрытии. Микро-

структура наплавленных покрытий имеет доэвтектическое строение (рисунок 5, *б*, *в*), а количество твердых частиц зависит от толщины диффузионного слоя на проволоке. При толщине нитроцементованого слоя 292 мкм (насыщение при температуре 860 °С и $\tau = 4$ ч) в структуре эвтектики меньше (рисунок 5, *б*), чем при толщине 550 мкм (насыщение при 950 °С и $\tau = 6$ ч) (рисунок 5, *в*). Количество эвтектики в структуре сказывается и на твердости наплавленного покрытия, которая достигает 4840–5540 МПа.



а – при температуре 600 °С; *б* – 860 °С; *в* – 950 °С

Рисунок 5 – Микроструктуры наплавленных покрытий, полученных из проволоки, подвергнутой насыщению азотом и углеродом ($\times 1000$)

Производственные испытания скользящих катодных контактов, наплавленных из разработанного присадочного материала при гальваническом осаждении металлов, показали, что износ рабочей поверхности не превышает 0,5 мм в течение трех месяцев эксплуатации, что обеспечило повышение стойкости не менее чем в три раза.

Заключение. В результате исследований структурообразования наплавленных покрытий, полученных из проволоки, подвергнутой предварительной химико-термической обработке, установлен фазовый состав, соотношение фаз в зависимости от температурно-временных параметров насыщения и вида химико-термической обработки. Показано, что предварительный процесс двухфазного борирования проволоки позволяет получить в структуре наплавленного покрытия большее количество эвтектики, чем при использовании однофазного борирования. Применение комплексного насыщения азотом и бором позволяет исключить появление α -фазы в структуре

наплавленного слоя и приводит к появлению TiN. Наплавленные покрытия, полученные из проволоки, подвергнутой высокотемпературной нитроцементации, имеют доэвтектическую структуру и фазовый состав: аустенит, TiN, Cr₇C₃.

Литература

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справочник / под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.

2. Гудремон, Э. Специальные стали: в 2 т.: пер. с нем. / Э. Гудремон. – М.: Металлургиздат, 1959. – Т. 2. – 824 с.

3. Стефанович, В.А. Исследования возможности получения наплавленных покрытий из борированной проволоки / В.А. Стефанович, С.В. Борисов // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2004. – С. 56–62.

4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г.В. Борисенко [и др.]. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.

5. Лахтин, Ю.М. Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М.: Машиностроение. 1976. – 256 с.

УДК 621.791.92

А.В. СТЕФАНОВИЧ (БНТУ)

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ШТАМПОВЫХ И БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ

Износостойкие наплавочные материалы являются высокоуглеродистыми легированными сплавами. Эти сплавы, как правило, обладают высокой износостойкостью благодаря наличию в структуре твердых фаз (карбидов, боридов и др.). Характер карбидной фазы (ее кристаллографическое строение, количество, форма и располо-