НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

Чернова Татьяна Георгиевна

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОГО УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫМ МЕТОДОМ В ВАКУУМЕ

Специальность 05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2005

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Неровный В.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ямпольский В.М.

кандидат технических наук, доцент
Драгунов В.К.

Ведущее предприятие - ОАО «Калужский турбинный завод».

Защита диссертации состоится «3» марта 2005 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Телефон для справок: 267-09-63.

Автореферат разослан «26» января 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Коновалов А.В.

Подписано к печати 26.01.2005 г. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 9 АП «Полиграфия», г.Калуга, ул. Тульская, д.13а

См. в конце

МТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1708731
Чернова Т.Г. Разработка пр

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди современных материалов, применяющихся в промышленности, вследствие высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и технологичности важное место занимают титановые сплавы.

Недостатком титановых сплавов является склонность к контактному схватыванию при трении, последующему глубинному вырыванию материала с одной поверхности и переноса его на другую. Следствием этого является необходимость поверхностного упрочнения изготавливаемых деталей, восстановления и поверхностного упрочнения изношенных деталей.

Разработанные технологии, однако, не всегда могут удовлетворить требованиям эксплуатации из-за низкой прочности сцепления покрытия с основой (напыление, гальваноосаждение) или невозможности восстановления исходной геометрии изношенных деталей (химико-термическая обработка (ХТО), ионное модифицирование, лазерное поверхностное легирование и др.)

Для ответственных и высоконагруженных деталей, согласно отечественной и зарубежной практике, рационально использовать наплавку в режиме пайки, исключающую подплавление и перегрев основы. Последнее важно, так как титановые сплавы являются чувствительными к термическому воздействию. Их высокотемпературный нагрев приводит к снижению исходных эксплуатационных свойств при превышении температуры начала структурных превращений и из-за активного реагирования с веществами-окислителями.

По нашему мнению наиболее эффективным является способ дуговой напайки титановых сплавов в вакууме с подачей порошкового композиционного припоя, состоящего из легкоплавкой матрицы (припоя) на основе титана и твердых армирующих частиц (например, карбидов тугоплавких металлов). Однако наличие твердых армирующих частиц в напаянном слое далеко не всегда обеспечивает требуемую износостойкость, то есть требуемое распределение микротвердости по толщине слоя.

Применение различных комбинированных способов упрочнения и восстановления позволяет относительно плавно и в широких пределах управлять характером распределения микротвердости по всей толщине наносимого слоя, что способствует повышению износостойкости последнего. Наиболее перспективными способами представляются напайка в вакууме с последующей ХТО, или газовым легированием напаянного слоя. Для реализации указанных способов можно использовать один и тот же источник энергии - дуговой разряд с полым катодом (ДРПК) в вакууме. В связи с изложенным, разработка процессов комбинированного упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей из титановых сплавов плазменно-дуговым методом в вакууме является актуальной

задачей.

Цель работы - повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей из титановых сплавов путем комбинированного упрочнения и восстановления с использованием ДРПК в вакууме.

Методы исследований.

Материал основы образцов определялся на спектрофотометре «Faundry Master».

Анализ изменения микротвердости по толщине напаянного покрытия, при переходе от покрытия к основному металлу, азотированного слоя был проведен на основе замеров микротвердости (по Виккерсу) на приборе ПМТ-3.

Микроструктура оценивалась на микроскопах ММР-4 и «Неофот-21» при увеличении от 100 до 500 крат.

Качественная оценка распределения концентраций элементов от поверхности напаянного покрытия к основному металлу была проведена на основе микрорентгеноспектрального анализа с помощью электронного сканирующего микроскопа CamScan-4 и энерго-дисперсионного анализатора dink AN10/85.

Научная новизна.

1. Предложена физическая модель взаимодействия аргон-азотной плазмы ДРПК с титановой поверхностью в твердой фазе. Установлена зависимость подачи аргон-азотной смеси через полость катода от скорости перемещения разряда, обеспечивающая максимальное насыщение азотом поверхности.

2. Определены закономерности газового легирования аргон-азотной плазмой ДРПК жидкой фазы титанового сплава. Установлено:

- определяющими факторами при газовом легировании являются температура нейтральных частиц и степень диссоциации азота в прианодной области разряда;
- максимальное насыщение азотом происходит при парциальном давлении азота в прианодной области разряда порядка 0,5 – 1 Па.

Практическая ценность.

Разработанный на базе дугового разряда с полым катодом (ДРПК) в вакууме комбинированный способ, объединяющий технологические процессы дуговой порошковой напайки с последующим газовым легированием в одну технологическую операцию, позволяет:

- восстанавливать и упрочнять поверхности изношенных деталей, упрочнять поверхности изготавливаемых деталей (толщина наносимого покрытия 0,5 – 2 мм),
- повысить микротвердость в нанесенном слое в 2 – 2,7 раза по сравнению с аналогичным показателем основного металла,
- управлять характером распределения микротвердости, для повышения в целом износостойкости всего покрытия,

- существенно повысить производительность процесса.

Апробация работы.

Основные положения работы доложены на научных семинарах кафедры М2-КФ «Технологии сварки» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана и кафедры МТ-7 «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов по работе, изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 21 таблицу и 93 наименования литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, методы исследований, научная новизна, практическая ценность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана характеристика работы деталей из титановых сплавов в узлах трения. Указаны причины, вызывающие механическое изнашивание контактирующих поверхностей: малая толщина окисной пленки, большая реакционная способность ювенильной поверхности, практически полное отсутствие адгезии поверхностью смазочных материалов.

Из анализа способов упрочнения рабочих поверхностей деталей из титановых сплавов следует, что существующие способы можно разделить на три группы:

1) изменение микроструктуры поверхностного слоя (без изменения ее химического состава) путем воздействия высоких температур, скоростей нагрева и охлаждения;

2) изменение состава поверхностного слоя, обеспечивающее желаемое изменение свойств (ХТО, ионное модифицирование, лазерное поверхностное легирование и др.);

3) нанесение на поверхность титана нового материала с необходимыми свойствами (наплавка, напыление, гальваноосаждение).

Для ответственных и высоконагруженных деталей, подвергнутых различным способам поверхностного упрочнения, наиболее важным является:

- прочность сцепления упрочненного слоя с основным металлом на уровне металлической связи и плотность нанесенного слоя,
- сохранение исходных физических и механических свойств основного металла.

Не менее важны также:

- возможность восстановления исходной геометрии изношенных деталей,

- высокая производительность процесса.

С указанных позиций наиболее рациональным способом представляется дуговая наплавка в режиме пайки (в дальнейшем - напайка) в вакууме. В качестве присадочного материала обычно используется порошковый композиционный припой, представляющий собой механическую смесь легкоплавкой матрицы (припоя) на основе титана и твердых армирующих частиц (например, карбидов тугоплавких металлов).

Однако наличие твердых армирующих частиц в нанесенном слое далеко не всегда обеспечивает требуемую износостойкость, то есть относительно равномерное распределение микротвердости по толщине слоя. Особенно это проявляется при толщине слоя свыше 0,5 мм.

Применение различных комбинированных способов упрочнения и восстановления позволяет относительно плавно и в широких пределах управлять характером распределения микротвердости. Наиболее перспективными способами представляются напайка в вакууме с последующей ХТО или поверхностным легированием напаянного слоя.

Согласно работам Ямпольского В.М., Неровного В.М., Перемитько В.В. и др., для реализации указанных способов можно использовать один и тот же источник энергии - дуговой разряд с полым катодом (ДРПК) в вакууме. Главная его особенность - широкая возможность управления тепловыми характеристиками путем изменения параметров режима, что позволяет эффективно использовать его для различных сварочных процессов (сварка, наплавка, пайка) и термообработки.

На основании изложенного сформулирована цель работы и поставлены следующие задачи:

1) разработать модель процесса физико-химического взаимодействия плазмы ДРПК низкого давления с поверхностью металла;
2) определить характер влияния состава плазмы ДРПК на механические свойства поверхности обрабатываемого материала, на скорость насыщения поверхности;
3) исследовать слои, полученные напайкой, напайкой с последующей ХТО, напайкой с последующим поверхностным легированием напаянного слоя с использованием ДРПК в вакууме;
4) разработать технологию и оборудование для комбинированного упрочнения и восстановления деталей из титановых сплавов плазменно-дуговым методом в вакууме.

Вторая глава посвящена исследованию слоя, полученного напайкой, напайкой с последующей ХТО напаянного слоя с использованием ДРПК в вакууме.

В качестве материала основы использовали листовой прокат толщиной 2 мм из сплава ОТ-4 и толщиной 6 мм из сплава АТ-3 по ГОСТ 19807-91. В качестве материала для износостойкого покрытия использовалась порошковая смесь ВТН-1, состоящая из относительно легкоплавкого припоя и армирующих частиц. Припой - ВПр16 системы Ti - Cu - Ni –

Zr с температурой плавления 1233 К. Армирующие частицы – карбиды вольфрама WC и W_2C, с высокой твердостью и температурой плавления 3173 К. Содержание армирующих частиц в смеси 70% весовых. Дисперсность смеси 100 - 150 мкм.

Для нанесения качественного покрытия напайку вели при соблюдении условий, рекомендованных в работах Перемитько В.В., Неровного В.М.

Металлографические исследования позволили установить зону термического влияния в основном металле шириной порядка 1,5-2,5 мм, характеризующуюся незначительным ростом зерна по сравнению с исходной структурой. Армирующие частицы соединены между собой и основным металлом припоем (матрицей). Подплавления армирующих частиц не выявлено. В процессе напайки происходит оседание армирующих частиц из-за того, что их плотность в 2,5 раза выше плотности припоя. В результате нижний слой напаянного покрытия обогащается армирующими частицами, толщина этого слоя 0,2 – 0,3 мм. Армирующие частицы в этом слое распределены равномерно.

Распределение концентраций Ni, Cu, Zr, W и Al по толщине покрытия и при переходе от покрытия к основному металлу (рис. 1), полученное с помощью микрорентгеноспектрального анализа, показало:
- отсутствие подплавления основного металла и перемешивания его с наносимым покрытием,
- существование диффузионного взаимодействия в системе титановый сплав - композиционный припой, что обусловлено возникновением металлических связей и вызывает расширение зоны объемного взаимодействия, что, в свою очередь, приводит к возрастанию прочности и надежности сцепления покрытия с основой.

Анализ микротвердости (по Виккерсу, нагрузка 0,5 Н, время выдержки 10 с) показал, что ее значения в упрочненном слое находятся в широком диапазоне (3570...25000 МПа) в зависимости от места измерения (матрица или армирующая частица). Значения микротвердости (рис. 2) в основном металле и зоне термического влияния практически одинаковые, что обуславливает минимальные изменения свойств основного металла. На границе между основным металлом и покрытием шириной 30-50 мкм значения микротвердости, примерно, на 30-40 % выше, чем в основном металле, а в матрице нанесенного покрытия микротвердость в 1,5 - 2 раза превышает аналогичный показатель основного металла.

Полученные результаты позволяют утверждать, что дуговая напайка в вакууме с подачей порошкового композиционного припоя дает возможность наносить покрытие с высокой прочностью сцепления с основой и при этом обеспечить минимальные изменения свойств основного материала.

Однако микротвердость матрицы нанесенного покрытия значительно ниже микротвердости армирующих частиц (WC - 17250 МПа, W_2C

– 25000 МПа), что в сочетании с неравномерным распределением последних по толщине покрытия не обеспечивает требуемую износостойкость, то есть относительно равномерное распределение микротвердости по толщине покрытия и ограничивает толщину покрытия (как правило не более 0,5 мм). К тому же, мы не можем относительно плавно управлять характером распределения микротвердости.

Нанесение многослойного покрытия также не позволяет получить равномерное распределение армирующих частиц - они все равно оседают в нижний слой покрытия.

Частично устранить указанные недостатки - повысить микротвердость верхних слоев покрытия, обедненных армирующими частицами - позволяет применение ХТО, а именно насыщения в твердой фазе, например, азотом, после напайки.

Для получения протяженного диффузионного слоя азотирование вели при соблюдении режимов, рекомендованных Перемитько В.В.. Азот подавали к обрабатываемой поверхности в смеси с аргоном через полый катод. Для предотвращения формирования нитридного слоя, обеспечивали преобладающую долю аргона в смеси (7:1). Время обработки 5 минут.

Анализ микротвердости (по Виккерсу, нагрузка 0,2 Н, время выдержки 10 с) показал, что микротвердость упрочненного слоя превышает микротвердость напаянного металла на 1300 – 1500 МПа, распределение микротвердости имеет более благоприятный для эксплуатации характер. Толщина упрочненного слоя 70 – 90 мкм в зависимости от доли азота в смеси. Возможно осуществление локального упрочнения.

На основании полученных результатов можно утверждать, что проведение азотирования после напайки позволяет повысить микротвердость верхних слоев покрытия, обедненных армирующими частицами, что улучшает характер распределения микротвердости (рис. 3а,б). Также, согласно литературным данным, азотирование, проведенное после напайки, позволяет повысить сопротивление усталости вследствие формирования напряжений сжатия высокого уровня.

Однако, для данного комбинированного способа - дуговой напайки в вакууме с последующим азотированием – толщина покрытия также ограничена (не более 0,5 мм), что в сочетании с малой производительностью процесса азотирования (1 – 5 мин.) делает предложенный комбинированный способ малоэффективным.

Для изыскания более эффективного способа необходимо знать закономерности взаимодействия плазмы ДРПК низкого давления с обрабатываемой поверхностью.

Поэтому третья глава посвящена разработке модели процесса физико-химического взаимодействия плазмы ДРПК низкого давления с поверхностью металла, определению характера влияния состава плазмы низкого давления на скорость насыщения поверхности.

Для разработки модели необходимо знать параметры плазмы в анодной области. Результаты зондовых исследований на всем протяжении дуги взяты из работ Неровного В.М., Перемитько В.В.

Однако, на участке контакта плазмы с анодом, экспериментальных данных нет, так как уже на расстоянии менее 0,5 мм от анода провести диагностику плазмы не представляется возможным.

Поэтому, для определения состава плазмы в области контакта плазмы с анодом рассматривали процессы от полости катода до поверхности анода.

Главным источником заряженных частиц в ДРПК является активная зона полого катода. При, например, азотировании в полый катод подается смесь аргона с азотом, исходный газ находится в молекулярном состоянии. В результате анализа неупругих столкновений электронов с молекулами, потенциалов ионизации и эффективных сечений можно сделать вывод, что в активной зоне плазма состоит из положительных ионов и нейтральных частиц (молекул и атомов) азота, что косвенно подтверждается спектроскопическими исследованиями Малышкина Е.А..

Столб разряда и анод не являются источником заряженных частиц. Значит, в области контакта плазмы с анодом плазма имеет почти такой же состав, как и в активной зоне.

Физическая модель взаимодействия плазмы ДРПК низкого давления с обрабатываемой поверхностью, по нашему мнению, заключается в следующем.

В приэлектродной зоне (слое объемного заряда) анода образуется то избыток, то нехватка электронов. В результате поверхностный слой анода циклически «перезаряжается» и анод то тормозит, то притягивает электроны, идущие из разрядного промежутка. Таким образом, на участке контакта плазмы с анодом концентрация электронов изменяется циклически. Около обрабатываемой поверхности (анода) присутствуют одновременно молекулы, атомы, положительные ионы азота (рис. 4а). Представляется, что молекулы и атомы газа, ударяясь об обрабатываемую поверхность, адсорбируются на ней. Только молекулы, адсорбируясь, сначала ориентируются определенным образом – «растягиваются», а, затем диссоциируют на обрабатываемой поверхности (рис. 4б). В случае, когда у поверхности анода избыток электронов, положительные ионы отталкиваются анодом (1) или нейтрализуются на его поверхности (2) (рис. 4в). В случае, когда у поверхности анода недостаток электронов, положительные ионы попадая на поверхность анода, могут испытать упругое (3) или неупругое (4) рассеяние, проникнуть в глубь металла (5) или нейтрализоваться на его поверхности (6) (рис. 4г). В результате на аноде образуется слой из атомов азота, который далее образует с металлом раствор внедрения. Диффузия идет по междоузлиям или вакансиям, по вакансиям – энергетически проще. При диффузии атомов азота возможны два механизма:

1. Атом азота отдает электрон, в результате чего появляются N^+ и Ti^-. Далее происходит диффузия N^+, причем усиленная ставшим «более отрицательным» металлом анода.
2. Адсорбированный атом может ионизироваться вследствие обмена зарядом с твердым телом, в результате чего появляются N^- и Ti^+.

Для оценки скорости процесса насыщения сравнили коэффициенты диффузии при обработке в ДРПК и тлеющем разряде. Получили, что при обработке в ДРПК коэффициент диффузии на два порядка выше.

Движущей силой диффузии является градиент концентрации насыщающего элемента. Для оценки градиента концентрации сравнили потоки частиц, идущих на обрабатываемую поверхность при обработке в ДРПК и тлеющем разряде. Получили, что при обработке в ДРПК поток частиц на два порядка выше.

Таким образом, увеличение коэффициента диффузии на два порядка при обработке в ДРПК по сравнению с тлеющим разрядом можно объяснить увеличением на два порядка потока частиц, идущих на обрабатываемую поверхность, при обработке в ДРПК по сравнению с тлеющим разрядом. Однако, важен не только поток частиц на обрабатываемую поверхность, но и то, какое количество азота может принять титан.

Для определения количества азота, которое может принять титан, воспользовались теорией адсорбции Ленгмюра, согласно которой, толщина слоя, образовавшегося на аноде, равна одной молекуле, слой имеет максимально плотную упаковку, каждая молекула имеет форму шара. Учитывая максимальное содержание примесного азота в титане и принимая, что азот равномерно распределен по объему титана, установлено, что:

- 1 мм^3 титана может максимально принять $98{,}55 \cdot 10^{-8}$ г азота,
- градиент концентрации азота в титане существует на расстоянии $15{,}23 \cdot 10^{-7}$ см от поверхности, то есть на этом расстоянии масса примесного азота, содержащегося в титане равна массе мономолекулярного слоя на обрабатываемой поверхности,
- градиент концентрации азота соответствующий предельному насыщению титана, равен $0{,}24 \cdot 10^{16}$ см$^{-4}$.

Также получено выражение для определения общего массового расхода газа Q в зависимости от скорости перемещения разряда υ для предельного насыщения азотом в ДРПК $Q = 0{,}8 \cdot \upsilon$ [мг/с].

Самой медленной стадией при образовании диффузионного слоя является диффузионная стадия, поэтому она и является определяющей скорость обработки в целом. Следовательно, основную причину интенсификации процесса насыщения следует искать именно в ускорении диффузии.

Движущей силой диффузии является градиент концентрации насыщающего элемента. Градиент концентрации существует, если одновременно осуществляется:

- подвод активного газа – азота к обрабатываемой поверхности,
- отвод азота в глубь обрабатываемого материала.

Отвод азота проще осуществлять в жидком материале, так как жидкости быстрее перемешиваются, а, следовательно, быстрее идут сорбционные процессы.

Таким образом, мы считаем, что рационально осуществлять подвод активного газа – азота к обрабатываемой поверхности, находящейся не в твердом, а в жидком состоянии.

Для этого необходимо определить закономерности взаимодействия аргон-азотной плазмы ДРПК с расплавом титана. Система аргон-азотная низкотемпературная плазма – титан является открытой и неравновесной, поэтому при решении задачи сделаны упрощения, позволяющие оценить поведения системы при изменении ее параметров.

Рассматривали только химическое взаимодействие - процесс переноса азота в системе плазма – металл. Предполагали, что образующийся раствор азота в металле является бесконечно разбавленным, однородным по составу и температуре. Было принято также, что вблизи поверхности металла газовая фаза состоит из атомарного и молекулярного азота и что она изотермична и однородна по составу.

При взаимодействии плазмы с металлом химический потенциал растворенного в нем азота выравнивается с потенциалом азота газовой фазы (внешняя среда). Выравнивание происходит за счет изменения концентрации азота в металле.

Выражение для расчета концентрации азота имеет вид:

$$[N] = \alpha^{\frac{\alpha T}{T_m}} \times (1-\alpha)^{\frac{(1-\alpha)T}{2T_m}} \times$$

$$\times \exp\left[\frac{0{,}5(1-\alpha)\mu^0_{N_2}(T) + \alpha\mu^0_N(T) - \psi^0_N(T_m)}{RT_m}\right] \times (p_{N_2})^{\frac{(1+\alpha)T}{2T_m}}$$

где α - степень диссоциации азота,

p_{N_2} - парциальное давление азота, Па,

T - температура нейтральных частиц (атомов и молекул) газовой фазы, К,

T_m - температура металла, К,

$\mu^0_{N_2}(T), \alpha\mu^0_N(T), \psi^0_N(T_m)$ - стандартные химические потенциалы, зависящие от температуры соответственно нейтральных частиц газовой фазы и металла, Дж / моль,

R - универсальная газовая постоянная, Дж / (моль·К).

Таким образом, концентрация азота является функцией трех параметров:
- температуры нейтральных частиц газовой фазы,
- степени диссоциации азота,
- парциального давления азота.

Для определения влияния указанных параметров на концентрацию азота провели численный эксперимент. При статистической обработке экспериментальных данных применяли регрессионный анализ, основанный на подсчете среднего значения, и дисперсионный анализ, основанный на представлении общей вариации экспериментальных данных в виде суммы вариаций. При определении силы влияния факторов дисперсионный анализ более чувствителен.

В результате получили, что температура нейтральных частиц и степень диссоциации азота в прианодной области разряда оказывают на концентрацию азота в расплаве почти в 3 раза большее влияние, чем парциальное давление азота.

С помощью полученной модели регрессионного анализа рассчитали, что парциальное давление азота в прианодной области разряда, при котором происходит максимальное насыщение азотом расплава титана, порядка p = 0,5 - 1 Па.

Глава 4 посвящена разработке технологии и элементов оборудования для процесса комбинированного упрочнения.

На основе моделирования взаимодействия плазмы ДРПК низкого давления с поверхностью металла, а также полученных выводов, нами разработана технология комбинированного упрочнения, которая объединяет технологические процессы дуговой порошковой напайки и газового легирования, а именно насыщения в жидкую фазу напаянного слоя.

Первый слой наносят напайкой с подачей порошкового композиционного припоя (рис. 5а). Второй слой наносят наплавкой с дополнительной подачей активного газа, например CO_2, в жидкую фазу, получаемую при расплавлении напаянного слоя (рис. 5б).

Разработанная технология была опробована на образцах, представленных НПО «ВИАМ». В качестве материала основы использовали листовой прокат толщиной 6 мм из сплава АТ-3 по ГОСТ 19807-91. В качестве порошкового припоя использовалась смесь ВТН-1. Подача активного газа (CO_2) осуществлялась по схеме, представленной на рисунке 5б.

Металлографические исследования показали, что по сравнению с напайкой (см. главу 2), в матрице, окружающей армирующие частицы, выявлены скопления мелких (меньше диагонали отпечатка индентора) включений округлой формы. Также, по сравнению с напайкой, наблюдается заметное измельчение структуры в нанесенном слое.

Анализ микротвердости (по Виккерсу, нагрузка 0,2 Н, время выдержки 15 с) (рис. 6) показал, что скопления мелких включений матрицы имеют достаточно высокую твердость (6600...8500 МПа). Предположительно данные включения являются карбидами металлов, входящих в состав порошкового припоя (TiC, ZrC). Микротвердость матрицы покрытия в среднем в 2 - 2,7 раза превышает аналогичный показатель основного металла.

Таким образом, реализация предложенного комбинированного

способа поверхностного упрочнения по сравнению с дуговой напайкой в вакууме с последующей ХТО, позволяет:
- повысить микротвердость матрицы напаянного покрытия (в среднем до 8000 МПа),
- улучшить характер распределения микротвердости по толщине покрытия,
- существенно повысить производительность процесса,
- увеличить толщину покрытия до 0,5 – 1 мм с достижением более высоких значений микротвердости.

Управлять характером распределения микротвердости при переходе от покрытия к основному металлу позволяет применение:
1. различных активных газов (N_2, CO_2),
2. различных порошков или порошковых смесей.

Предлагаемая технология может быть реализована с помощью горелки и оснастки, разработанных для процессов сварки, наплавки и пайки с использованием ДРПК в вакууме.

Предложена более компактная конструкция горелки.

Предложена более компактная конструкция системы охлаждения магнитной системы, позволяющая рационально расположить транспортную магистраль и регулировать положение выходного сечения подводящей трубки питателя относительно оси горелки с возможностью фиксации каждого нового положения.

Для обеспечения возможности регулирования количества подаваемого порошка, минимальной сепарации частиц с разной плотностью, любого соотношения компонентов в порошковой смеси, стабильности подачи порошка в зону обработки в широком диапазоне давлений в вакуумной камере предложена конструкция порошкового питателя. На данный порошковый питатель получено положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2003126726/02(028761) «Порошковый питатель» от 3.09.03.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ эксплуатации ответственных и высоконагруженных деталей из титановых сплавов показал, что для повышения надежности и ресурса их работы рабочую поверхность узлов трения следует упрочнять и восстанавливать при сохранении исходных механических свойств основного металла. Наиболее перспективным для этой цели представляется применение комбинированных способов упрочнения и восстановления с использованием дугового разряда с полым катодом.

2. Исследования слоя, нанесенного за один проход дуговой напайкой в вакууме с подачей порошкового композиционного припоя, показали незначительный рост зерна в приповерхностном слое основы. Характер распределения концентраций Ni, Cu, Zr, W и Al от поверхности покрытия к

основному металлу свидетельствует о минимальном изменении свойств основного материала и высокой прочности сцепления покрытия с основой. При этом микротвердость матрицы нанесенного покрытия значительно ниже микротвердости армирующих частиц, что при неравномерном распределении последних по толщине покрытия не обеспечивает в целом требуемую износостойкость.

3. С целью повышения износостойкости всего покрытия толщиной свыше 0,5 мм можно дополнительно повысить микротвердость матрицы поверхностного слоя, обедненного армирующими частицами, путем азотирования в твердой фазе или газового легирования (азотом, углекислым газом) при расплавлении поверхностного слоя.

4. Предложена физическая модель взаимодействия аргон-азотной плазмы ДРПК низкого давления с обрабатываемой поверхностью–анодом. Относительно глубокое насыщение порядка 70 ... 90 мкм обусловлено потоком частиц порядка 10^{16} $с^{-1}см^{-2}$.

5. Экспериментально установлено, что азотирование в твердой фазе с помощью ДРПК увеличивает микротвердость поверхностного слоя матрицы покрытия на 1300 – 1500 МПа, что способствует повышению износостойкости покрытия в целом. Однако, глубина азотированного слоя, как правило, не превышает 70 ... 90 мкм, что ограничивает технологические возможности (толщина покрытия не более 0,5 мм) данного комбинированного способа упрочнения.

6. С помощью численного эксперимента, регрессионного и дисперсионного анализа, частных моделей определены закономерности газового легирования, а именно насыщения в жидкую фазу азотом, с помощью ДРПК. Температура нейтральных частиц и степень диссоциации азота в прианодной области разряда оказывают на концентрацию азота в расплаве почти в 3 раза большее влияние, чем парциальное давление азота. Максимальное насыщение азотом происходит при парциальном давлении азота в прианодной области разряда порядка 0,5 – 1 Па.

7. На базе дугового разряда с полым катодом (ДРПК) в вакууме разработан комбинированный способ восстановления и упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов, объединяющий дуговую порошковую напайку с последующим газовым легированием (азотом, углекислым газом) в одну технологическую операцию.

8. Реализация предложенного комбинированного способа восстановления и упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов приводит к заметному измельчению структуры в нанесенном слое, повышению микротвердости матрицы нанесенного слоя в 2 – 2,7 раза по сравнению с аналогичным показателем основного металла, изменению характера распределения микротвердости, повышающему в целом износостойкость всего покрытия.

9. Разработана конструкция порошкового питателя для обеспечения регулирования количества подаваемого порошка, минимальной се-

парации частиц с разной плотностью, повышения стабильности подачи порошка в зону обработки в широком диапазоне давлений в вакуумной камере, любого соотношения компонентов в порошковой смеси. На разработанный порошковый питатель получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

1. Неровный В.М., Чернова Т.Г. Порошковые питатели для дуговой пайки и наплавки в вакууме // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. - №1. - С. 17 – 20.
2. Неровный В.М., Чернова Т.Г. Упрочнение деталей из титановых сплавов плазменно дуговой обработкой в вакууме // Технологические и материаловедческие проблемы в условиях рыночной экономики: Труды научно-технической конференции / Под. ред. проф. Н.И. Касаткина – М., 1998. - С. 44 – 47.
3. Неровный В.М., Чернова Т.Г. Поверхностное упрочнение титановых сплавов плазменно-дуговой обработкой в вакууме // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Труды Всероссийской научно-технической конференции, 21 – 22 ноября 2000г., г. Калуга. – М., 2000. – С. 23.
4. Чернова Т.Г. Анализ порошковых питателей применительно к вакуумным технологиям нанесения покрытий // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2001. – № 581 Методы исследования и проектирования сложных технических систем. - М. - С. 117 – 125.
5. Чернова Т.Г. Оценка коэффициента диффузии при азотировании в ДРПК // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - М., 2003 г., Т.1. - С 44.
6. Чернова Т.Г. Адсорбция азота титаном // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - М., 2003 г., Т.1. - С 45.
7. Неровный В.М., Чернова Т.Г. Исследование покрытий при плазменно-дуговой обработке в вакууме титановых сплавов // Сварка и контроль 2004: Материалы Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. - Пермь, 2004 г., Т.3. - С. 147 - 150.

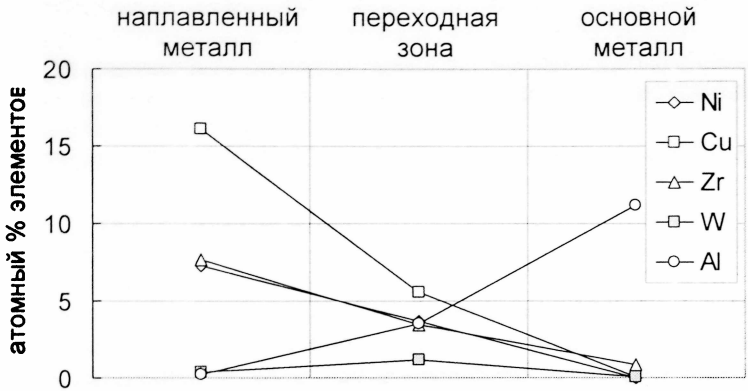


Рис.1. Распределение элементов по толщине покрытия и при переходе от покрытия к основному металлу

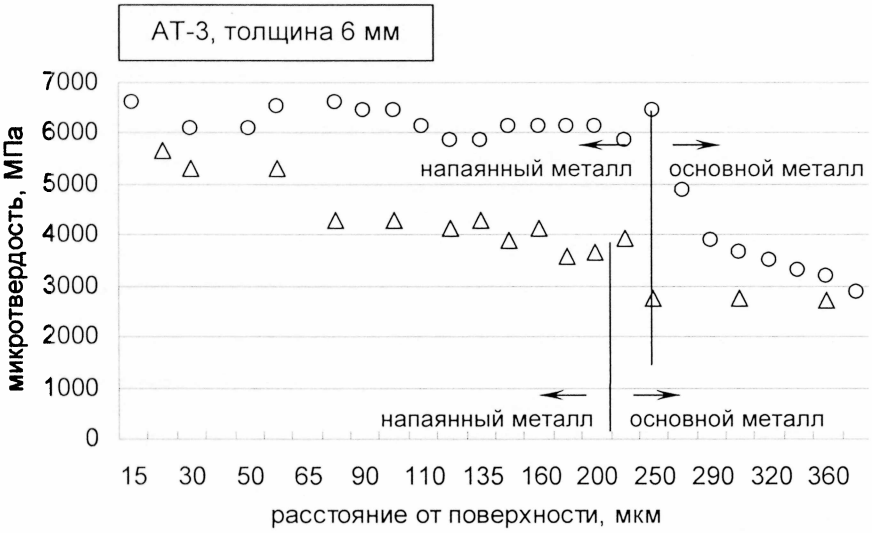


Рис. 2. Распределение микротвердости в матрице напаянного слоя

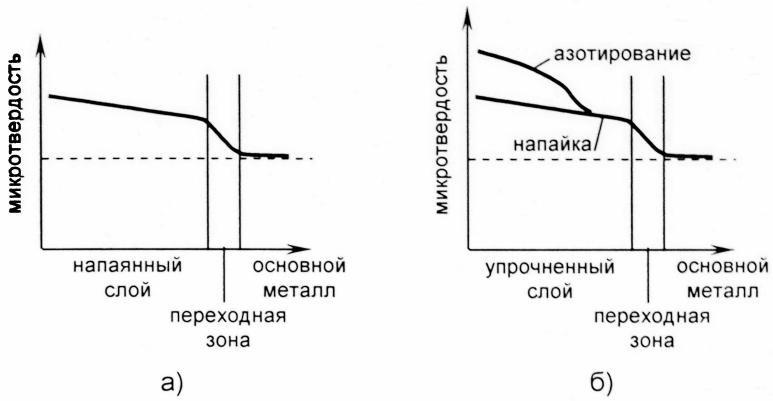


Рис. 3. Распределение микротвердости в матрице покрытия при переходе от поверхности к основному металлу:
а) напайка, б) напайка с последующим азотированием

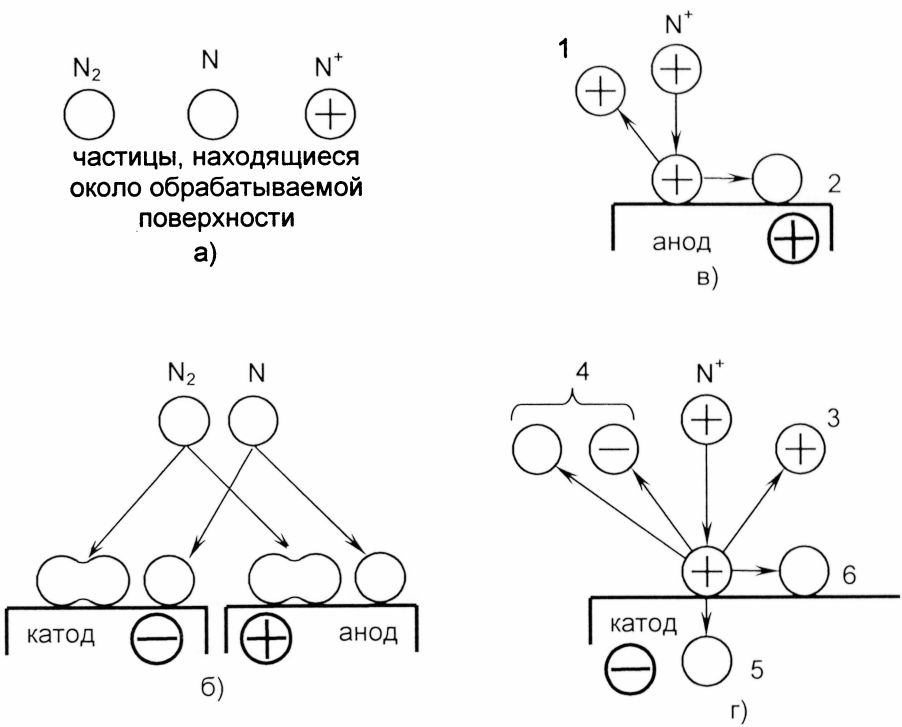


Рис. 4. Физическая модель взаимодействия плазмы ДРПК с обрабатываемой поверхностью

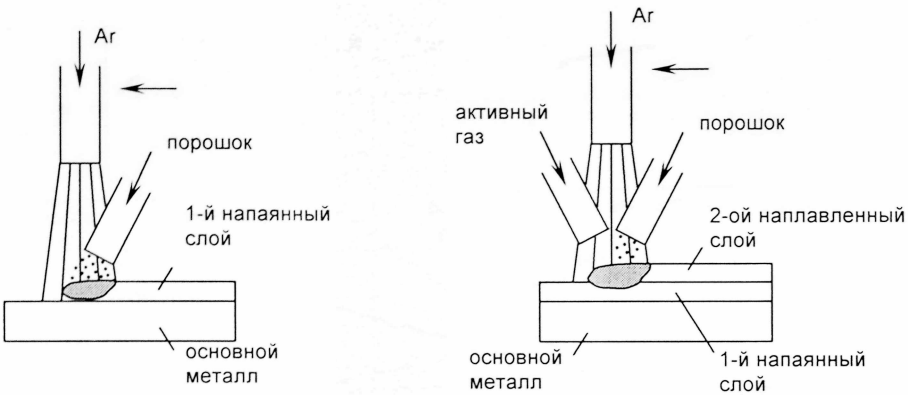


Рис. 5. Схема предлагаемой технологии комбинированного упрочнения



Рис. 6. Распределение микротвердости в напаянном слое