

Плазма высокочастотных (ВЧ) разрядов пониженного давления ($p = 13,3 - 133$ Па) является перспективным инструментом обработки материалов различной природы. Она позволяет эффективно обрабатывать органические и неорганические материалы с различным внутренним составом и структурой, а также поверхности изделий сложной конфигурации. В результате ее воздействия возможно улучшение сразу нескольких параметров, например, повышение усталостной прочности одновременно с наведением в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений и уменьшением шероховатости. Природа возникновения таких эффектов, очевидно, связана с одновременным разноплановым воздействием ВЧ плазмы на поверхность твердых материалов. Во-первых, при такой обработке удаляются поверхностные загрязнения, включая оксидные пленки, технологические смазки и т.д., которые неизбежно присутствуют на поверхности материалов. Во-вторых, в результате обработки снижается шероховатость поверхности материалов, т.к. ионная бомбардировка концентрирует ионное воздействие на вершинах микронеровностей. В-третьих, бомбардировкой ионов при ВЧ плазменной обработке достигается залечивание микротрещин поверхности материала. В-четвертых, бомбардировка позволяет улучшать внутреннюю структуру материалов за счет перераспределения дефектных слоев. Это, в свою очередь, снижает риск возникновения центров разрушения материалов, особенно при знакопеременных нагрузках. Экспериментальные исследования показали, что в результате воздействия ВЧ плазмы пониженного давления на исследованные материалы изменяется цвет поверхности, что свидетельствует об образовании тонкой пленки. С целью установления влияния воздействия высокочастотной (ВЧ) плазмы на свойства поверхности, проведена обработка различных металлов и их сплавов: стали коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные и износостойкие типа 30Х13, 12Х18Н9Т, 08Х18Т1; стали конструкционные, углеродистые качественные типа сталь 50, сталь 40, сталь 30; титановые сплавы ВТ-1, ВТ-3, ВТ-6, ВТ-8, ВТ-9; алюминиевые сплавы Д16Т, АМЦ, силумины. Нанополировка поверхностей металлов потоком высокочастотной плазмы. С целью установления закономерностей взаимодействия ВЧ плазмы с поверхностью материалов проводилась обработка образцов при варьировании входных параметров установки в следующих диапазонах: внутренний диаметр разрядной камеры изменялся от 10 до 110 мм, потребляемая мощность – от 2,5 до 18 кВт, частота генератора – 1,76 и 13,56 МГц. Вакуумный блок (рис.1) создан на базе установки, предназначенной для нанесения тонких слоев металлов и диэлектриков в вакууме. Основание вакуумного блока смонтировано в виде сварного каркаса, на верхней плоскости которого крепится плита. На ней размещены вакуумный колпак и подколпачные механизмы: карусели с образцами, устройства подъема и опускания карусели. Внутри каркаса блока размещены ВЧ плазмотрон, система вакуумных трубопроводов, вентили, подъемник колпака с электроприводом,

блок электропитания, система водяного охлаждения узлов установки. В колпаке предусмотрены устройства ввода и вывода для подачи дополнительного потенциала на изделие. Рис. 1 - Вакуумный блок установки для получения ВЧ плазмы. Вакуумная откачная система построена на базе двухроторного насоса типа АВР-50 с быстротой действия 50 л/с. Система питания плазмотрона рабочим газом состоит из баллона со сжатым газом, редуктора для понижения давления, образцового манометра и ротаметра для определения расхода газа и игольчатого накателя для регулирования расхода, устройства для получения смеси газов. Система водоснабжения установки служит для обеспечения заданного теплового режима деталей и узлов, наиболее нагруженных в тепловом отношении: генераторной лампы, индуктора, разрядной камеры, вакуумного колпака. Подвод воды к установке и отвод из нее осуществляется при помощи резиновых шлангов. Аппаратура контроля применяется для контроля входных параметров установки: ВЧ напряжения и тока, частоты генератора при проведении всех экспериментов по обработке материалов. Для измерения давления в ходе исследования использовался образцовый манометр. Калибровка образцового манометра производилась по показаниям компрессионного манометра «вакустата» Брунера, с помощью которого оценивалась также точность показаний. Погрешность измерения давления в рабочей камере составляет 5 %. С целью установления закономерностей взаимодействия ВЧ-плазмы с поверхностью материалов проводилась обработка образцов при варьировании входных параметров установки в следующих диапазонах: расход плазмообразующего газа 0,025-0,15 г/с, потребляемая мощность – от 2,5 до 10 кВт, частота генератора – 1,76 МГц. В качестве рабочего газа при исследовании процессов финишной очистки и нанополировки поверхностей использовался технически чистый аргон. Для повышения микротвердости поверхности изделия использовалась смесь газов из аргона и азота в соотношении 70% на 30%. Предварительное давление в рабочей камере – от 1,33 до 13,3 Па, рабочее давление – от 13,3 до 133 Па, расход плазмообразующего газа – до 0,15 г/с. Внутренние характеристики разряда и плазменной струи при этом изменяются в следующих диапазонах: концентрация электронов $n_e = 10^{17} - 10^{19}$ 1/м³, плотность тока в плазме $j = 0,8 - 1,0$ А/м², напряженность магнитного поля в ВЧИ разряде $H_z = (0,6 - 2,5) \cdot 10^3$ В/м, скорость потока 70-500 м/с, толщина СПЗ до 1,5–2 мм, энергия ионов $W_i = 40 - 80$ эВ и плотность ионного тока $j_i = 0,3 - 15$ А/м². Образцы материалов закреплялись в специальных креплениях на карусельных устройствах таким образом, чтобы при вводе их в поток неравновесной низкотемпературной плазмы проводилась обработка строго определенной зоны образца. Образец устанавливался перпендикулярно потоку. Для устранения побочных эффектов образцы перед плазменной обработкой при изучении состава и структуры обезжиривались и обезвоживались. В качестве рабочего газа при исследовании процессов

финишной очистки и нанополировки поверхностей использовался технически чистый аргон. Предварительное давление в рабочей камере – от 1,33 до 13,3 Па, рабочее давление – от 13,3 до 133 Па, расход плазмообразующего газа – до 0,15 г/с. Образец устанавливался перпендикулярно потоку. Для цилиндрических образцов предусматривалось вращение в процессе модификации поверхностного слоя. Приспособление либо заземлялось, либо специально изолировалось от базовой плиты вакуумного поста. Для устранения побочных эффектов образцы перед плазменной обработкой при изучении состава и структуры обезжиривались и обезвоживались. Температура образца при установлении закономерностей изменения свойств поверхностного слоя от плазменных параметров выбиралась такой, чтобы, с одной стороны, максимально интенсифицировать плазменные процессы, а с другой – чтобы при этой температуре термообработка не была бы доминирующим фактором. Эффективность плазменной обработки определяли по величине изменению шероховатости δRa и виду поверхности. Установлено, что воздействие низкоэнергетическими ионами на поверхность металлов приводит к различным эффектам. Во-первых, при такой обработке удаляются поверхностные загрязнения, включая оксидные пленки, технологические смазки, которые неизбежно присутствуют на поверхности материалов. Во-вторых, в результате обработки снижается шероховатость поверхности материалов, т.к. ионная бомбардировка концентрирует ионное воздействие на вершинах микронеровностей. В-третьих, бомбардировкой ионов при ВЧ плазменной обработке достигается заживление микротрещин поверхности материала. В-четвертых, проникновение ионов в поверхностный слой приводит к перераспределению дефектов в слое и как следствие улучшается внутренняя структура материала, что снижает риск возникновения центров разрушения, особенно при знакопеременных нагрузках. Рис. 2 - Изменение шероховатости поверхности стали 40 в зависимости от состава плазмообразующего газа и напряжения на аноде. Как видно из рис.2 наибольший эффект наблюдается при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси аргона и пропан-бутана в соотношении 70% и 30%. Этот эффект можно наблюдать и на рис.3 и 4. Рис. 3 - Изменение шероховатости поверхности сплава ВТ-1 в зависимости от состава плазмообразующего газа и напряжения на аноде. Рис. 4 - Изменение шероховатости поверхности стали 12Х18Н10Т в зависимости от состава плазмообразующего газа и напряжения на аноде. Представленные рисунки показывают возможность уменьшения шероховатости с помощью высокочастотной плазмы. Упрочнение поверхности металлов и их сплавов. Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что в диапазоне энергии ионной бомбардировки 10-100 эВ и плотности ионного тока на поверхность 0,1-5 А/м² происходит модификация поверхностного слоя исследованных материалов толщиной 70-420 нм, в том числе изменение состава

приповерхностного нанослоя. Результаты экспериментальных исследований показали, что при добавлении в плазмообразующий газ реагирующих газов (N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , $C_3H_8 + C_4H_{10}$) состав образцов из металлов и сплавов изменяется в большей степени, чем при обработке в среде чистого аргона. Совокупность результатов по модификации поверхности сталей, титановых сплавов в потоке ВЧ плазмы свидетельствует о том, что на поверхности образуются нанодиффузные покрытия. Микроструктура сталей и титановых сплавов после обработки в ВЧ плазмы изменяется. Характер изменения зависит от режима обработки. В целом проведенное исследование показывает, что при воздействии ВЧ плазмы на поверхности сплава ВТ1, также как и на стали 30Х13, образуется очень тонкая защитная поверхностная пленка. Образцы сплава ВТ8 обрабатывались в ВЧ плазме в тех же режимах, что и ВТ1 после отжига и предварительной электрохимической полировки. При рентгеноструктурных исследованиях не выявлено появления новых фаз. Параметры решетки изменяются довольно сильно в сторону увеличения как параметра a , так и c . При измерении твердости, также как и для сплава ВТ1, обнаружена тенденция повышения твердости поверхности после обработки в кислородосодержащей плазме. Образцы из стали 30Х13 обрабатывались ВЧ плазмой в тех же режимах. После обработки сталь покрывается тонкой пленкой желтого цвета. Аналогичные результаты получены при обработке стали 12Х18Н9Т, титанового сплава ВТ6 и алюминиевых образцов. Сопоставление полученных данных свидетельствует о следующем. Ни в одном образце не обнаружено образования новых фаз. Фазовый состав после всех режимов обработки аналогичен исходному. Обнаружено повышение твердости после обработки. Для стали 12Х18Н9Т увеличение параметра « a » после воздействия плазмой связано со сжимающими макронапряжениями и с изменением химического состава поверхностного слоя. Увеличение ширины линий на дифрактограмме является следствием более высокого уровня микроискажений поверхностного слоя, связанного с наклепом, упрочнившим поверхность после воздействия неравновесной плазмой. Изменение параметров кристаллической решетки приводит к изменениям физико-механических свойств поверхностных слоев. Металлографические исследования показали, что глубина модифицированного слоя составляет до 200 мкм. Результаты измерения микротвердости H_m , образцов металлов с различной предварительной обработкой поверхности (после шлифовки, полировки, поверхностного пластического деформирования) показывают заметное увеличение ее для всех исследованных материалов. Рис. 5 - Зависимость увеличения микротвердости титанового сплава ВТ-1 от времени обработки. Рис. 6 - Увеличения микротвердости стали 12Х18Н10Т. Таким образом с помощью ВЧ плазмы пониженного давления могут быть получены модифицированные поверхности металлов и их сплавов.