

По результатам измерения при использовании базового значения допуска на колебание ИМР за оборот 1,1 % зубчатых колес были оценены как «негодные». При использовании уточненного значения допуска на колебание ИМР за оборот все 100% зубчатых колес были оценены как «годные».

Выводы

1. Предложена методика уточнения параметров двухпрофильного контроля F_{ir}'' , f_{ir}'' , $+E_{a''s}$ и $-E_{a''i}$ при использовании безоператорного двухпрофильного контроля с записывающим устройством.

2. Экспериментально подтверждены предложенные параметры двухпрофильного контроля F_{ir}'' и f_{ir}'' . Установлено, что при использовании базовых параметров колебания измерительного межосевого расстояния по ГОСТ 1643-81 при проведении безоператорного контроля без учета технологических погрешностей измерительных колес и учета влияния углов зацепления при измерении некорректная оценка точности контролируемых зубчатых колес может достигать 25%.

3. Предлагаемое оснащение безоператорного двухпрофильного контроля системой ЧПУ позволяет решить важнейшие проблемы для изготовителей зубчатых передач: гарантировать точность изготовленных зубчатых передач и обеспечить использование современных средств двухпрофильного контроля

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. /– Изд. стандартов, М., 1981. – 46 с.

2. Марков, А.Л. Измерение зубчатых колес. /А.Л.Марков. – Изд.4-е, перераб. и доп. – Л.:Машиностроение, 1977. – 280 с.

3. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / В.Е.Антонюк [и др.]; под общ.ред. В.Е.Старжинского, М.М.Кане. – С-Пб.: Профессия, 2007. – 832 с.

УДК 621.795

Жоглик И.Н.

АКТИВАЦИЯ АЗОТА ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИОНАМИ ТИТАНА В ПЛАЗМЕ ВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА ЛИНЕЙНОГО ИСПАРИТЕЛЯ

Физико-технический институт

Национальной Академии Наук Беларуси

г. Минск, Беларусь

Процессы взаимодействия молекул азота с ионами Ti плазмы разряда в вакууме электродуговой исследованы методами масс-спектрометрии и оптической спектроскопии. Импульс электрического поля, создаваемого системой электродов, расположенных в пространстве плазменного потока определяется тем, что может привести к значительному увеличению степени ионизации молекул и атомов азота. Ионы азота вступают в реакцию прямого синтеза с ионами титана и образуют защитно-декоративные нитриды титановым покрытием. Устройство сепаратор-активатор создан для линейного испарителя дуги в серийное производство золотого покрытия на зеркальной нержавеющей стали для куполов церквей.

Введение

Формирование защитно-декоративных нитрид титановых покрытий на листовой зеркальной нержавеющей стали для последующей эксплуатации в строительных конструкциях при атмосферных условиях вызывает необходимость высокой стабильности и повторяемости технологического процесса. Это связано с тем, что на листах зеркальной нержавеющей стали площадью около 1 м^2 и конструкций из большого количества таких листов, отклонения в равномерности и повторяемости цвета визуальны весьма различимы. Установлено, что технология формирования покрытий с требуемой равномерностью и повторяемостью цвета при использовании аксиальных электродуговых испарителей не достигается. Причина заключается в том, что линейные размеры катода аксиального испарителя значительно меньше размеров листа, на котором формируется покрытие. Ухудшает повторяемость процесса производства изменение свойств плазменного потока по мере расходования катода испарителя. Конструктивно наиболее целесообразны протяженные испарители, размер катода которых соответствует размеру покрываемой поверхности, а запас расходоуемого материала катода значительно выше. Для разработки оптимального технологического процесса, предпочтительно использование линейного электродугового испарителя (ЛЭДИ). Однако, при всех конструктивных преимуществах ЛЭДИ, формируемые покрытия не обладают необходимыми цветовыми характеристиками, что свидетельствует о не достаточной активности частиц технологического газа при отсутствии внешних электромагнитных полей, интенсифицирующих взаимодействие частиц плазмы и газа.

Анализ результатов исследований показывает, что реализация технологического процесса нанесения защитно-декоративных нитрид титановых покрытий необходимого золотистого цвета с требуемой равномерностью толщины и повторяемостью свойств, может быть обеспечена при использовании ЛЭДИ, оснащенного дополнительным устройством активации технологического газа.

Методика эксперимента

Разработка нового технологического процесса с обеспечением необходимой равномерности и повторяемости цвета, потребовала исследование и оптимизацию параметров интенсификации взаимодействия частиц технологического газа с титановой плазмой ЛЭДИ при использовании нового устройства активатора плазменного потока.

Плазменная схема ЛЭДИ является плазменной системой диодного типа, содержащей два электрода катод и анод, магнитные поля, как правило, не применяются. Разряд инициируется устройством поджига на одном из концов катода, при этом катодное пятно двигается ко второму концу катода в сторону токоввода. В случае, если бы азот поступал в плазму в ионизированном виде, то нитрид титана образовывался в результате реакции прямого синтеза $Ti_i^+ + N^+ + 2e = Ti_iN$, где $2e$ – электроны тока рекомбинации ионов на поверхности подложки, вызывающих ионный ток по величине достигающий 10 % от тока дугового разряда. Но азот в естественном состоянии находится в связанном химически неактивном молекулярном виде N_2 , чтобы получить ионы, необходима дополнительная энергия, чтобы разделить молекулы и ионизировать. Это частично решается подачей на подложку отрицательного потенциала притягивающего ионы и отталкивающего электроны, что в некоторой степени активирует молекулы технологического газа. Однако на практике, стабильно получать нитрид титановое покрытие требуемого золотистого цвета с помощью ЛЭДИ не удается, как правило, покрытия получаются белесыми, что свидетельствует о недостатке собственно нитрида титана в покрытии, поэтому требуется активация молекул азота внешними электромагнитными полями. Применение магнитного поля конструктивно достаточно сложно и не технологично в реализации. В то время как, электрическое поле значительно превосходит магнитное поле по эффективности воздействия на частицы в плазме, следовательно, необходим третий электрод с положительным потенциалом относительно анода, с помощью которого возможно увеличение степени ионизации частиц технологического газа. Для предотвращения «привязки» дугового разряда к третьему электроду, применяется импульсное электропитание с соответствующими параметрами, в результате чего становится возможным создание триодной плазменной схемы.

Экспериментальное моделирование процессов активации проводилось при использовании вакуумной установки, описание которой приведено в работе [1]. Вакуумная камера ВУ-1 оборудована электродуговым испарителем, за которым расположен третий электрод - ионная линза в виде титанового цилиндра. По оси источника и линзы на верхнем фланце вакуумной камеры установлен масс-спектрометр. Оптическое излучение плазмы попадает через отверстие в стенке ионной линзы и кварцевое окно вакуумной камеры в оптический спектрометр. Управление разверткой и сбор данных осуществляется с помощью компьютера. Силовое питание дугового источника осуществляется от сварочного трансформатора, ионная линза питается от специально разработанного импульсного источника БПС.

Результаты и их обсуждение

По результатам исследований ионного состава плазмы вакуумного электродугового разряда на титановом катоде в работе [2] установлено, что основную часть ионного компонента составляют двухзарядные ионы Ti^{2+} (70%), однозарядные ионы Ti^{1+} составляют 25%, трехзарядные Ti^{3+} - 5% при токе дуги 60 А. На рис.1. представлена зависимость содержания ионов титана в плазменном потоке дугового разряда, соотношение которых определено измерением интенсивности линий масс-спектров ионов.

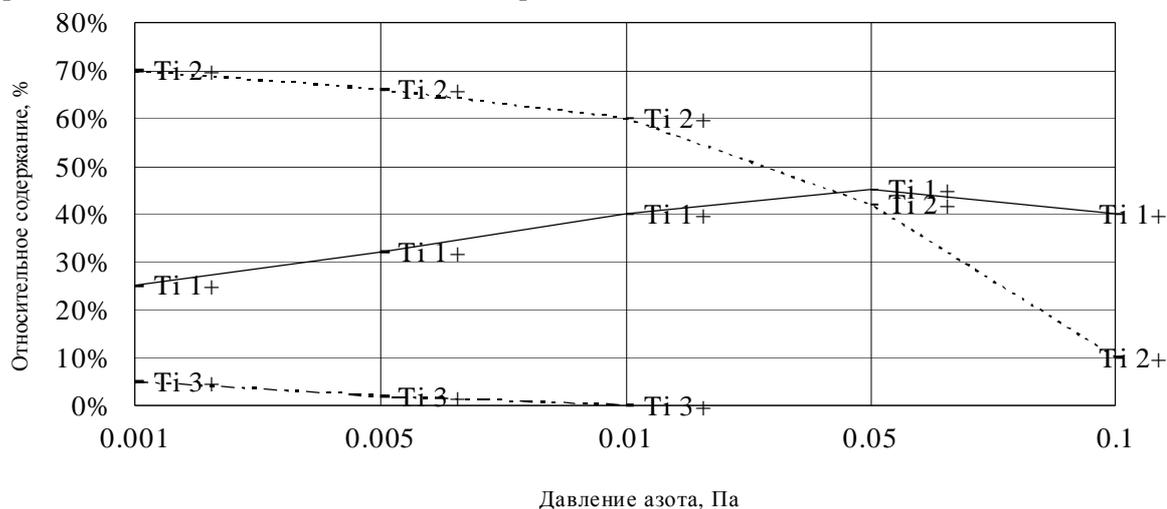


Рисунок 1 – Зависимость относительного содержания ионов титана в плазменном потоке от давления азота, при токе дугового разряда 60 А

После увеличения давления азота, доля двухзарядных ионов (пунктирная линия) уменьшается, а однозарядных (сплошная линия) увеличивается, при давлении 0.05 Па их содержание примерно уравнивается. Уменьшение в плазме доли многозарядных ионов Ti^{2+} и Ti^{3+} , при одновременном увеличении содержания однозарядных ионов Ti^{1+} свидетельствует о «перезарядке» ионов, при которой плазмохимическая реакция может быть представлена выражением: $Ti^{2+} + N_2 = Ti^{1+} + N_2^+$; $Ti^{3+} + N_2 = Ti^{1+} + 2N^+$.

Влияние процессов ион-молекулярного взаимодействия на степень ионизации азота изучали по интенсивности оптического излучения активированных частиц азота с помощью оптического монохроматора-спектрометра, методика приведена в работе [3]. На рис. 2. представлен спектр излучения плазмы дугового разряда в среде азота при давлении 0.05 Па.

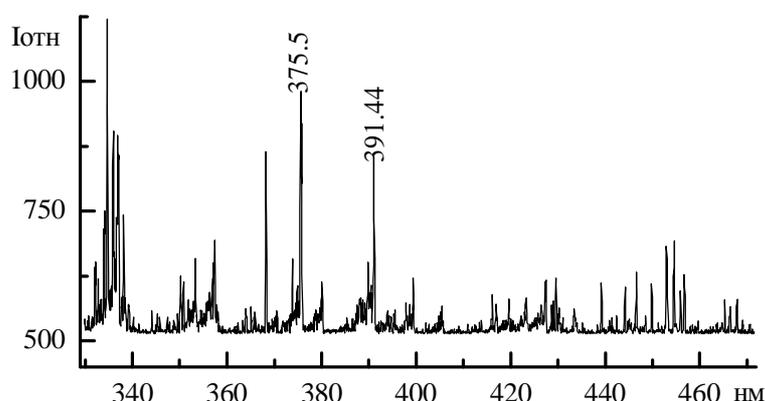


Рисунок 2 – Оптический спектр титановой плазмы при давлении азота $P=0.05$ Па, ток дуги 60

Наиболее интенсивной молекулярной линией является линия N_2 ($\lambda=375.5$ нм). После включения питания ионной линзы значительно возрастает интенсивность свечения плазмы. На рис. 3. представлен оптический спектр, полученный при потенциале ионной линзы 20 В и токе 50 А. Интенсивность ионизированных молекул N_2^+ ($\lambda=391.44$ нм, $\lambda=427.81$ нм) возрастает в 1,5...3 раза, а интенсивность молекул N_2 ($\lambda=375.5$ нм) уменьшается. Это свидетельствует о том, что в электрическом поле ионной линзы происходит дополнительная ионизация молекул азота, при которой осуществляется плазмохимическая реакция: $T_i^{1+} + N_2 + E^* = T_i^{1+} + N_2^+ + 2e$, где E^* - внешнее электрическое поле, $2e$ – электроны, образующие ток ионной линзы. В поле ионной линзы происходит разделение плазменного потока т.е. отбор большого количества электронов, сопоставимого с количеством электронов дугового разряда, о чем свидетельствует величина тока ионной линзы близкая к величине тока дуги. При этом, возбужденные ионами титана молекулы азота, также теряют связанные молекулярными связями валентные электроны, ионизируются и становятся и химически более активными.

А

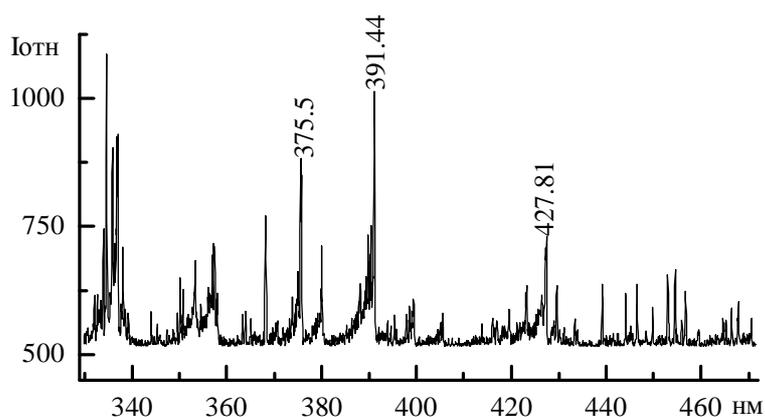


Рисунок 3 – Оптический спектр титановой плазмы при давлении азота $P=0.05$ Па, ток дуги 60 А, потенциал ионной линзы 20 В при токе 50 А

Зависимость среднего рабочего тока ионной линзы от действующего напряжения импульсного источника питания БПС представлена на рис. 4, получена для дугового разряда в условиях исходной степени вакуума $P = 0.001$ Па (пунктирная линия) и в случае подачи в вакуумную камеру азота при рабочем давлении $P = 0.1$ Па (сплошная линия).

Рабочий ток ионной линзы, при увеличении рабочего напряжения БПС от 0 до 16 В, растет достаточно быстро, свыше 16 В рост тока замедляется. Это объясняется тем, что прямое катодное падение потенциала в дуговом разряде находится примерно на этом же уровне. При более высоком действующем рабочем напряжении БПС, возрастает мощность рассеивания на

электродах сепаратора-активатора, в то время как интенсивность линий N_2^+ возрастает в меньшей степени.

На основании этого можно сделать вывод, что оптимальным технологическим режимом работы является рабочее напряжение БПС на уровне 12...16 В. Визуально, эффект воздействия ионной линзы на плазменный поток наблюдается после включения БПС появлением яркого свечения оранжевого цвета в пространстве вокруг электродов, что вызвано излучением возбужденных и ионизированных частиц азота.

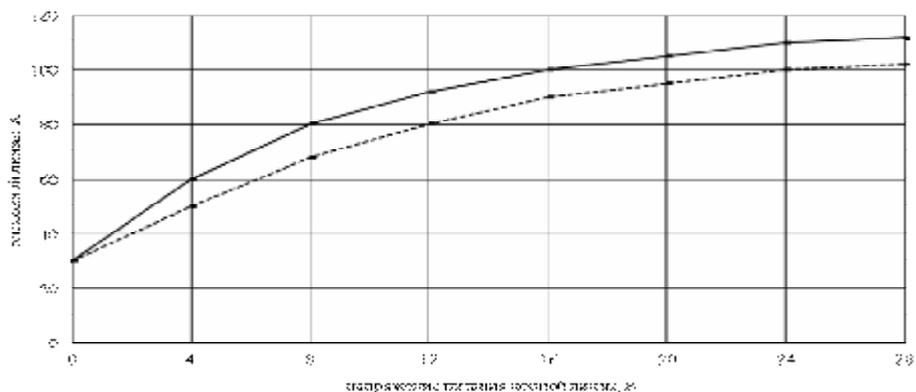


Рисунок 4 – Зависимость тока ионной линзы от напряжения БПС: пунктирная линия – разряд в вакууме при давлении $P = 0.001$ Па; сплошная линия – разряд в среде азота при давлении $P = 0.1$ Па

Управляющее действие анодного напряжения ионной линзы, в интересующем нас диапазоне, характеризуется крутизной S_i :

$$S_i = \frac{\Delta I_i}{\Delta U_i}$$

где ΔI_i – приращение тока ионной линзы, ΔU_i – приращение напряжения ионной линзы. В данном диапазоне, крутизна вольтамперной характеристики ионной линзы $S_i = 2.5$ А/В. Эта величина S_i значительно меньше крутизны вольтамперной характеристики дугового испарителя $S_a = 100$ А/В, следовательно S_i является параметром, не требующим дополнительных средств стабилизации т.е. является самостабилизирующимся.

График зависимости действующего напряжения U_d дугового разряда испарителя от напряжения U_c БПС при исходном остаточном давлении в вакуумной камере $P = 0.001$ Па и рабочем давлении азота $P = 0.1$ Па представлен на рис. 5.

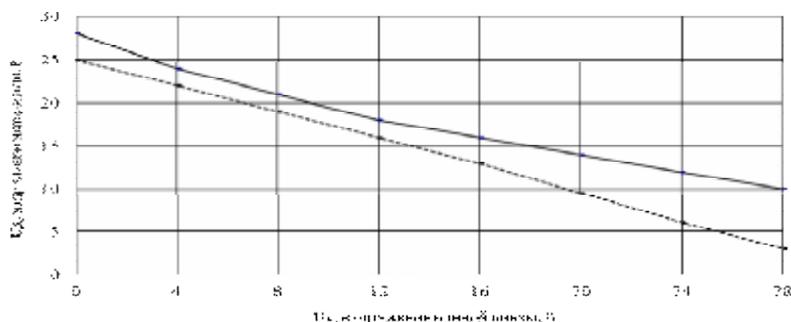


Рисунок 5 – Зависимость рабочего напряжения дугового разряда ЛЭДИ от напряжения БПС: сплошная линия – разряд в вакууме при давлении $P = 0.001$ Па; пунктирная линия – разряд в среде азота при давлении $P = 0.1$ Па

Зависимость действующего напряжения дугового разряда в вакууме представлена верхней линией, в исходном состоянии при U_c БПС = 0 оно имеет величину $U_d = 28$ В. В случае

дугового разряда в среде азота при давлении $P = 0.1$ Па зависимость представлена нижней линией, при U_c БПС = 0 оно имеет величину $U_d = 25$ В. По мере увеличения U_c БПС до величины 28 В, действующее напряжения U_d дугового разряда уменьшается, практически линейно до уровня 10 В. В случае дугового разряда в среде азота при давлении $P = 0.1$ Па, при U_c БПС = 28 В, действующее напряжение дугового разряда $U_d = 3$ В.

На основании полученных зависимостей установлено, что дуговой разряд с тремя силовыми электродами в атмосфере азота создает более проводимую плазму т.к. имеется достаточно большое количество носителей заряда. Вольтамперная характеристика, при этом, имеет линейный вид, параметры тока и напряжения подчиняются закону Ома. В то время, как вольтамперная характеристика дугового разряда с тремя силовыми электродами в вакууме имеет нелинейный вид, соответствующий характеристике вакуумного триода, из-за меньшего числа носителей заряда.

На основе установленных оптимальных параметров плазмы стационарного электродугового разряда, разработан способ активации молекул азота импульсным электрическим полем, которое подается к третьему электроду – ионной линзе относительно внутрикамерного анода испарителя. При этом, применительно к ЛЭДИ, ионная линза выполняется в виде «беличьей клетки» для минимального затенения плазменного потока. Это в свою очередь, делает возможным создание конструкции активатора, совмещенной с теньвым сепаратором плазменного потока [5,6] и получить новое устройство сепаратор-активатор. Это устройство может быть выполнено в секционированном виде из ряда угольных электродов размещенных вокруг катода ЛЭДИ в чередующемся порядке через один с аналогичными электродами внутрикамерного анода ЛЭДИ. Количество угольных элементов зависит от необходимой степени сепарации, при более высоком токе дугового разряда содержание капельной фазы увеличивается и степень сепарации т.е. количество элементов необходимо увеличивать.

Синтез защитно-декоративных нитрид титановых покрытий на зеркальной нержавеющей стали осуществляется при соединении ионов титана с активированными частицами азота, валентные электроны которых уже обобществлены т.е. частицы ионизированы, либо валентные электроны «перегреты» в достаточной степени, чтобы в приповерхностном слое подложки частицы азота отдавали возбужденные валентные электроны и вели себя как ионы. Активация частиц азота происходит за счет повышения степени взаимодействия ионов титана с молекулами азота в поперечном ионному току электрическом поле, которое создается чередующимися стержневыми электродами внутрикамерного анода и электродами сепаратора-активатора, образующими управляющую сетку с поперечным электронным током дуговому разряду. Этим достигается максимальное сечение взаимодействия частиц газа с ионами титана и оптимальный эффект активации. Импульсное электропитание сепаратора-активатора предотвращает анодную «привязку» разряда. Эффективность способа достаточно высока т.к. практически возможно получение ярко золотистых покрытий на неметаллических подложках таких как стекло, керамика, пластмассы.

В вакуумной камере лист зеркальной нержавеющей стали с максимальными габаритами 533 x 1600 мм для вакуумной камеры установки ВУ-700, размещается на арматуре вокруг линейного электродугового испарителя с системой электродов внутрикамерного анода и сепаратора-активатора. Дуговой разряд инициируется устройством электронного поджига с керамическим электродом на конусообразной крышке из титана на верхнем торце катода, катодное пятно перемещается хаотически от электрода поджига в сторону силового токовода. Дугогашение осуществляется в зазоре между катодом и устройством дугогашения, размещенном на фторопластовом изоляторе и находящемся под «плавающим» потенциалом. Электродуговой разряд ЛЭДИ является стационарно–периодическим с длительностью периода 2...3 секунды. Синтез нитридтитанового покрытия с требуемыми цветовыми параметрами осуществляется при определенном давлении технологического азота в условиях его активации под воздействием импульсного электрического поля сепаратора-активатора.

Выводы

Использование импульсного электрического поля в условиях стационарного дугового разряда, дает возможность активировать молекулы технологического азота путем повышения

степени взаимодействия их с ионами и электронами титановой плазмы. Создано устройство активации молекул технологического газа с возможностью дополнения функцией сепарации плазмы от капельной фазы сепаратор-активатор для оснащения линейных электродуговых испарителей вакуумных ионно-плазменных установок. Реализован способ синтеза нитрид титановых покрытий при использовании импульсных электрических полей в плазме стационарного электродугового разряда [7]. Использование линейного электродугового испарителя, оснащенного сепаратором-активатором, обеспечивает синтез нитрид титановых покрытий с высокой равномерностью цвета и стабильной повторяемостью результатов при серийном производстве продукции. С использованием листов зеркальной нержавеющей стали марки AISI-304 и AISI-430 с нитрид титановым покрытием золотистого цвета, построено около сотни объектов, которые эксплуатируются в атмосферных условиях более десяти лет без потери блеска и повреждения покрытий. К числу показательных примеров объектов можно отметить храм Георгия Победоносца д. Узноги, храм Великомученицы Параскевы д. Польшковичи, храм Православной церкви Могилевской епархии г. Могилев, Свято Вознесенская церковь г. Чаусы, храм архангела Михаила д. Сынковичи, Спасо-Вознесенский храм г. Горки, храм Святых Царственных Мучеников и всех Новомучеников и Исповедников XX века г. Могилев, храм Святой Живоначальной Троицы г. Волковысск, храм Святителя Николая Чудотворца д. Початово, Свято-Михайловский собор г. Слуцк, Спасо-Преображенский храм г. Шклов, храм Рождества Пресвятой Богородицы д. Торгуны, храм Державной иконы Божьей Матери г. Ивацевичи, храм Рождества Пресвятой Богородицы д. Русино, храм Успения Пресвятой Богородицы д. Новый Свержень, храм святого великомученика Пантелеймона г. Гомель, храм Равноапостольного Николая архиепископа Японского аг. Дуброва, Свято-Николаевский гарнизонный собор в Брестской крепости, храм иконы Казанской Божьей Матери в д. Барколабово, храм князя Владимира г. Минск, храм Рождества Иоанна Предтечи г. Минск, храм Андрея Первозванного г. Минск, Александро-Невский кафедральный собор г. Мстиславль, объекты государственного значения, в частности, памятник героям войны 1812 года г. Полоцк, дворец Независимости РБ г. Минск, и многие другие. Работа отмечена наградой Патриаршего Экзарха всея Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек, Ж. А. Установка для энергомассанализа процессов ионно-плазменного напыления / Ж. А. Мрочек, И. Н. Жоглик, И. А. Романчук, С. Ф. Комлик // Вакуумная техника и технология. Т. 1, № 2, 1991. с. 56-59.
2. Романчук, И.А. Масс-спектрометрические и зондовые исследования ионного компонента плазменного потока электродугового испарителя / И. А. Романчук, М. М. Семенкевич, И. Н. Жоглик // Труды конф. Вакуумные покрытия-87. Риг, 1987, с. 173-177.
3. Жоглик, И.Н. Исследование процесса активации азота в поле ионной линзы при формировании покрытий вакуумным электродуговым методом / И. Н. Жоглик, Н. И. Чубрик // Труды 2-й междунар. конф. Физика плазмы и плазменные технологии. Минск. 1997, Т. 4, с. 792-795.
4. Марков, Г.В. Нанесение покрытий вакуумным электродуговым методом / Марков Г.В., Жоглик И.Н. // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 3, с. 71-73.
5. Устройство для нанесения покрытий в вакууме: пат 1246 Респ. Беларусь, МПК7 C23C 14/35/ Жоглик И.Н., Григорович И.М., Синцов С.И.; заявитель Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». – № u20030308; заявл. 10.07.03, опубл. 30.03.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.–2004.–№ 1(40).–С. 245.
6. Устройство для нанесения покрытий в вакууме: пат 8431 Респ. Беларусь, МПК7 C23C 14/24/ Жоглик И.Н., Григорович И.М., Синцов С.И.; заявитель Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». – № a20030976; заявл. 24.10.03, опубл. 30.06.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.–2006.–№ 4(5).–С. 84.
7. Способ нанесения покрытий в вакууме: пат 8640 Респ. Беларусь, МПК7 C23C 14/32, 14/54, 14/00/ Жоглик И.Н., Григорович И.М., Синцов С.И.; заявитель Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». – № a20030977; заявл. 24.10.03, опубл. 30.06.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.–2006.–№ 4(5).–С. 103.