

О. Д. ГРИШКЕВИЧ, С. І. ГРИНЮК

**УНІВЕРСАЛЬНИЙ ПЛАЗМОВИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ
ІОННО-ПЛАЗМОВОЇ ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ***Інститут технічної механіки**Національної академії наук України та Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua*

Роботу присвячено розробці апаратурного забезпечення комбінованої іонно-плазмової технології зміцнюючої обробки металевих поверхонь. Стверджується, що оптимальна комбінація іонно-плазмових зміцнюючих технологій повинна включати технологію модифікації механічних властивостей металевої поверхні імплантацією іонів азоту (азотуванням) і технологію нанесення наноструктурного покриття. В якості модельного об'єкта для відпрацювання зміцнюючої обробки розглядалась деталь типу «вал». Технологією азотування обрано іонно-променеву технологію високоінтенсивної низькоенергетичної імплантації іонів азоту. Зазвичай імплантатція реалізується з використанням іонного джерела (прискорювача) з анодним шаром – (ПАШ). Для нанесення наноструктурного покриття було обрано іонно-плазмову технологію з використанням магнетронної розпорошуючої системи (МРС) незбалансованого типу з потужнострумовим імпульсним магнетронним розрядом (ПСІМР). Вибір було обумовлено тим, що в ПАШ і в МРС використовуються однотипні розряди з замкненим дрейфом електронів, що спрощує забезпечення їх сумісності за вакуумними умовами. Було випробувано інтегровану систему, що включала автономні плазмові пристрої – МРС і ПАШ. Таку компоновку технологічної системи було визнано неоптимальною через її громіздкість. Було досліджено можливість надання МРС функції нанесення покриття і функції генератора колімованого потоку газометалевої плазми. Реалізація такого завдання перетворювала МРС незбалансованого типу з ПСІМР в універсальний плазмовий пристрій для виконання комбінованої обробки. Експериментальні дослідження було спрямовано на підтвердження можливості реалізації комбінації технологічних процесів при використанні одного модернізованого плазмового технологічного пристрою магнетронного типу. Модернізація виконувалась задля створення високого показника незбалансованості магнітного поля в МРС. З цією метою було використано додаткову магнітну систему з зовнішньою магнітною котушкою, яку розташовано поза межами вакуумної камери. Для живлення ПСІМР використовувалося імпульсне низькочастотне (100 Гц) розрядне джерело власної розробки. Виконувались дослідження локальних і просторових характеристик потоку газометалевої плазми в пролітному просторі. Підтверджено широку можливість регулювання кута розльоту потоку плазми для регулювання ступеня локальності обробки поверхні. Локальні характеристики плазми, що були отримані в експериментах, відповідали вимогам для проведення іонно-плазмової зміцнюючої обробки. Ефективність імплантаційної обробки було підтверджено експериментом з азотування експериментального зразка. Отримано задовільні результати.

Ключові слова: іонно-плазмова технологія, високоінтенсивна низькоенергетична іонна імплантатція, наноструктурне покриття, потужнострумовий імпульсний магнетронний розряд, газометалева плазма, магнетронна розпилююча система, імпульсне джерело живлення розряду.

Работа посвящена разработке апаратурного обеспечения комбинированной ионно-плазменной технологии упрочнения металлических поверхностей. Утверждается, что оптимальная комбинация ионно-плазменных упрочняющих технологий должна включать технологию модификации механических свойств металлической поверхности имплантацией ионов азота (азотированием) и технологию нанесения наноструктурного покрытия. В качестве модельного объекта для упрочняющей обработки рассматривалась деталь типа «вал». Технологией азотирования избрана ионно-лучевая технология высокоинтенсивной низькоенергетической имплантации ионов азота. Имплантация реализуется с использованием ионного источника (ускорителя) с анодным слоем (УАС). Для нанесения наноструктурного покрытия избрана ионно-плазменная технология с использованием планарной магнетронной распылительной системы (МРС) несбалансированного типа с сильноточным импульсным магнетронным разрядом (СИМР). Выбор обусловлен тем, что в УАС и МРС используются однотипные разряды с замкнутым дрейфом электронов, что упрощает обеспечение их совместности по вакуумным условиям. Испытана интегрированная система, включающая автономные плазменные устройства – МРС и УАС. Такая компоновка технологической системы была признана неоптимальной из-за ее громоздкости. Была исследована возможность придания МРС функции нанесения покрытия и функции генератора коллимированного потока газометаллической плазмы. Реализация такого задания превращала МРС несбалансированного типа с СИМР в универсальное плазменное устройство для выполнения комбинированной упрочняющей обработки. Экспериментальные исследования были направлены на подтверждение возможности реализации такой комбинации технологических процессов при использовании одного модернизированного плазменного технологического устройства магнетронного типа. Модернизация была направлена на создание высокого показателя несбалансированности магнитного поля в МРС. С этой целью использовалась дополнительная магнитная система с внешней расположенной за пределами вакуумной камеры магнитной катушкой. Для питания СИМР использовался импульсный низкочастотный (100 Гц) разрядный источник собственной разработки. Выполнялись исследования локальных и пространственных характеристик потока газометаллической плазмы в

© О. Д. Гришкевич, С. І. Гринюк, 2020

пролетном пространстве. Подтверждена широкая возможность регулирования величины угла раствора потока плазмы для регулирования степени локальности обработки. Локальные характеристики плазмы, достигнутые в экспериментах, соответствуют требованиям проведения ионно-плазменной упрочняющей обработки. Эффективность имплантационной обработки подтверждалась экспериментом по азотированию экспериментального образца. Получены удовлетворительные результаты.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, высокоинтенсивная низкоэнергетическая ионная имплантация, наноструктурное покрытие, сильнооточный импульсный магнетронный разряд, газометаллическая плазма, магнетронная распылительная система, импульсный источник питания разряда.

This work is devoted to the development of equipment for a combined ion-plasma metal surface strengthening technology. An optimal combination of ion-plasma strengthening technologies should include a technology of modification of the mechanical properties of a metal surface by nitrogen ion implantation (nitriding) and a nanostructured coating deposition technology. The strengthening treatment object was a shaft. An ion-beam technology of high-intensity low-energy nitrogen ion implantation was used for nitriding. The implantation was implemented using an anode-layer ion source (accelerator). For nanostructured coating deposition, the authors chose an ion-plasma technology that uses an unbalanced magnetron sputtering system with a high-current pulsed magnetron discharge (HCPMD). This choice was due to the fact that both an anode-layer accelerator and a magnetron sputtering system use single-type discharges with closed electron drift, which facilitates their vacuum condition compatibility. An integrated system that includes an anode-layer accelerator and a magnetron sputtering system, i.e., independent plasma devices, was tested. That configuration was not found to be optimal because of its bulkiness. It was studied whether it was possible to make a magnetron sputtering system perform functions of coating deposition and collimated gas-metal plasma flow generation. If so, an unbalanced HCPMD magnetron sputtering system would become a universal plasma device for combined strengthening treatment. Experimental studies were conducted to verify the feasibility of this combination of processes with the use of a single upgraded magnetron-type plasma process device. The upgrade was aimed at attaining a high degree of magnetic field unbalance. For this purpose, use was made of an additional magnetic system with an external magnetic coil (outside of the vacuum chamber). The HCPMD was powered using a proprietary low-frequency (100 Hz) switching discharge supply. The local and space characteristics of a gas-metal plasma beam in the drift region were studied. It was confirmed that the plasma beam angle can be varied over a wide range to control the treatment locality degree. The local plasma characteristics attained in the experiments meet the requirements for ion-plasma strengthening treatment. The implantation treatment efficiency was confirmed in a test specimen nitriding experiment, whose results were satisfactory.

Keywords: ion-plasma technology, high-intensity low-energy ion implantation, nanostructured coating, high-current pulsed magnetron discharge, gas-metal plasma, magnetron sputtering system, pulsed discharge power source.

Вступ. Освоєння ефективних технологій, що базуються на використанні властивостей нанорозмірних систем, прискорюється в усьому світі і істотно розширює можливості нової області фундаментальної і прикладної науки «інженерія поверхні» [1]. Актуальність напряму «інженерія поверхні», що включає технології поверхневого зміцнення, обумовлено логікою розвитку сучасного високотехнологічного машинобудування, що призводить до необхідності урахування економічних, екологічних і соціальних факторів розвитку суспільства. Затребуваність інженерії поверхні обумовлено також умовами експлуатації сучасних машин, що ускладнюються, механізмів та інших металевих конструкцій; це пред'являє підвищені вимоги до якості конструкційних матеріалів. Зростання виробництва високолегованих сталей на цей час обмежено світовим дефіцитом легуючих компонентів і стимулює розвиток альтернативних технологій підвищення їх споживчих властивостей. Такою альтернативою є технології поверхневої модифікації службових властивостей робочих поверхонь деталей і елементів металевих конструкцій, виготовлених з більш дешевих конструкційних матеріалів.

На цей час розроблено і досліджено більше ста різних варіантів технологій модифікації фізико-механічних властивостей поверхні. Технології, що засновані на фізичних методах впливу на поверхню металевих виробів концентрованими енергетичними потоками [2], визнаються одними із найбільш перспективних напрямів технології PVD - Physic Vapor Deposition. Крім того, трендом розвитку технологічної бази сучасного машинобудування є екологі-

чно чисті вакуумні технології. Іонно-плазмові технологічні процеси відрізняються високим рівнем формалізації, що дозволяє створювати роботизовані, екологічно чисті і безлюдні виробництва. Усі ці фактори визначають підвищений попит на іонно-плазмові технології інженерії поверхні.

Постановка задачі. В сучасній технологічній практиці для підвищення ефективності зміцнення поверхні перевага надається комплексним технологіям [3], що включають мінімум два доповнюючі один одного зміцнюючі технологічні процеси. Оптимальне сполучення технологій зміцнення поверхні включає попередню модифікацію фізико-механічних властивостей поверхневого шару конструкційного матеріалу і наступне нанесення захисного покриття, яке відповідає умовам експлуатації виробу. При цьому вибираються технології, що забезпечують мінімальну трудомісткість обробки. Такі вимоги приводять до необхідності створення технологічного устаткування для реалізації комплексних технологій, що містять мінімум технологічних переходів. В області іонно-плазмової технології прикладом такої технології може бути процес на основі вакуумно-дугового випарника (ВДВ), що включає процес модифікації поверхні іонним азотуванням з наступним нанесенням шару покриття [4]. Така технологічна обробка поверхні виконується безперервно, тобто без зупинки вакуум-плазмової технологічної установки на перезавантаження.

Здатність ВДВ генерувати потік частинок матеріалу покриття у вигляді іонів дозволяє отримувати якісні покриття. Між тим, ВДВ має особливість, що полягає в тому, що генерація іонів в ВДВ супроводжується генерацією мікрокрапельних частинок матеріалу катода. Це явище значно ускладнює отримання високоефективних покриттів наноструктурного класу. Було розроблено способи подолання цього недоліку, але вдалі рішення, що забезпечували сепарацію плазмового потоку від мікрокрапельної фази, призводили до істотного ускладнення конструкції технологічної установки і до одночасного падіння продуктивності процесу нанесення покриття.

Принципова відміна магнетронної розпорошуючої системи (МРС) від вакуумно-дугового випарювача (ВДВ) полягає в тому, що характер розпилення катоду-мішені МРС є принципово безкрапельним [5]. Але МРС має іншу вадку. Базова (незбалансована) конструкція МРС не забезпечує отримання необхідного рівня адгезії покриття. На цей час розроблено спосіб подолання цієї вади МРС. Це стало можливим завдяки використанню імпульсно-періодичного режиму магнетронного розряду [6] і застосуванню іонного асистування процесу конденсації покриття [7]. До речі, видалення вади, що заважала отриманню високоякісного покриття, додатково призвело до суттєвого розширення технологічних можливостей магнетронної розпорошуючої системи.

Таким чином, сучасні технологічні системи на основі МРС відкривають можливості модифікації і поліпшення механічних властивостей поверхні і створення покриттів шляхом атомної збірки на основі принципів нанотехнології. За цією причиною на цей час МРС визнається найбільш перспективною системою для реалізації іонно-плазмової технології зміцнення поверхонь. Відштовхуючись від судження про оптимальність складу пристроїв для комплексної технології зміцнення, при розробці комплексної іонно-плазмової технології нами було віддано перевагу варіанту апаратурного забезпечення на основі плазмових пристроїв, що містять розряд з замкненим дрейфом еле-

ктронів. До цього класу технологічних плазмових пристроїв відносять магнетронну розпорошуючу систему [5] і систему для формування енергетичного потоку газових іонів – ПАШ (прискорювач іонів з анодним шаром) [8]. Сформулюємо основні вимоги до технологічних плазмових пристроїв для забезпечення комплексної іонно-плазмової технології зміцнення поверхонь тертя.

Вимоги до плазмових технологічних пристроїв. Плазмові технологічні пристрої, що нами розроблялися, були орієнтовані на обробку зовнішньої поверхні деталі типу «вал». Особливістю універсального плазмового пристрою, що розроблявся, була необхідність забезпечення посиленої зміцнюючої обробки локальних ділянок поверхні, що зазнають підвищеного зносу тертям. У відповідності до геометрії деталі (циліндрична труба діаметром 100 мм, довжиною 500 мм) форма зони обробки вибиралась круглою або подовженою у відповідності до довжини деталі. Ширина зони обробки вибиралась рівною 50 мм. Обробка всієї поверхні забезпечувалась гвинтоподібною траєкторією переміщення деталі відносно іонно-плазмових технологічних пристроїв або забезпечувалась тільки обертанням деталі. Розмір області іонної обробки передбачалося забезпечити магнітним і балістичним фокусуванням іонного променя в ПАШ.

Якщо іонний прискорювач ПАШ, за визначенням, призначений для формування колімованого променя іонів, то для додання магнетронній системі властивостей джерела колімованого потоку плазми необхідна була глибока модернізація його конструкції. Основою для модернізації служила раніше розроблена нами модель магнетрону МРС 50 [9].

Розглядалась можливість одночасного застосування в МРС деяких ефективних конструктивних рішень, відомих з [10, 11]. Коротко охарактеризуємо ці вдосконалення МРС.

Використання імпульсно-періодичного режиму розряду МРС. Цьому питанню присвячено наші роботи [6, 12]. Реалізація імпульсного магнетронного розряду дозволяє істотно інтенсифікувати процес розпорошення, тобто підсилити інтенсивність потоку матеріалу покриття на поверхню, що зміцнюється. За рахунок значного підвищення струму в потужнострумових розрядних імпульсах відбувається іонізація розпорошеного матеріалу. Це дозволить істотно підвищити долю металевих іонів у газометалевому потоці. Очевидно, що така трансформація розряду повинна була сприяти поліпшенню якості зміцнюючої обробки.

Для забезпечення іонного асистування процесу конденсації покриття часто використовують додаткове джерело газових іонів. З цією ж метою в МРС створюють умови для відбору газових іонів з магнітної пастки магнетронного розряду [13]. Останнє можливо шляхом створення незбалансованості магнітної системи МРС. Існують різні конструктивні рішення цієї задачі. Раніше нами було розроблено ряд оригінальних конструктивних рішень [14, 15], які передбачалися для використання в конструкції універсального плазмового пристрою.

Використання режиму нанесення покриття з іонним асистуванням шляхом розриву магнітної пастки МРС дозволяє сформувати колімований іонний потік на поверхню, що оброблюється. Колімованість потоку є необхідною умовою для забезпечення обробки обмеженої області поверхні.

Передбачалося, що одночасна реалізація згаданих вище варіантів модернізації МРС дозволить розширити її функціональність і надати їй якості, притаманні технології з вакуумно-дуговим випарювачем [4].

Дослідження робочих характеристик варіантів магнетронних технологічних пристроїв інтегрованого типу. При створенні плазмових пристроїв для проведення комплексної зміцнюючої обробки поверхні нами було використано два типи плазмових розрядних пристроїв з незалежними джерелами живлення розрядів. Це прискорювач іонів з замкненим дрейфом електронів і анодним шаром – ПАШ 125. Діаметр розрядного каналу прискорювача дорівнював 125 мм. В прискорювачі було реалізовано магнітне і балістичне фокусування іонного потоку. При розрядній напрузі 3 кВ прискорювач забезпечував у фокусі на відстані 100 мм густину іонного струму до 20 мА/см². На рисунку 1 показано вигляд сфокусованого в прискорювачі іонного променя.

Для створення потоку частинок матеріалу покриття використовувався планарний магнетрон ПЛНБМРС 50 з катодом-мішенню діаметром 50 мм. В



Рис. 1 – Сфокусований потік газових іонів в ПАШ 125

процесі роботи базова конструкція МРС зазнала декілька змін, що стосувалися забезпечення необхідного високого рівня незбалансованості магнітної системи.

Попередні випробування зв'язки незалежних плазмових пристроїв продемонстрували, що концепція автономності плазмових пристроїв має сенс тільки на етапі відпрацювання технології іонно-плазмової обробки. Для практичного застосування така схема виявляється

недостатньо гнучкою і занадто громіздкою.

Розроблялися варіанти суміщення (інтеграції) функцій магнетронного розпорошення і генерації потоку енергетичних газових іонів в єдиній конструкції. Зовнішній вигляд інтегрованого плазмового пристрою зі співвісною компоновкою МРС і ПАШ показано на рисунку 2.

Інтегрований пристрій включав магнетрон базової конструкції – МРС 50 і співвісно змонтований іонний прискорювач ПАШ 125.

Попередні випробування інтегрованого пристрою показали перспективність ідеї, але конструкція потребувала удосконалення.

Конструктивну схему планарної магнетронної розпорошуючої системи з поліпшеним показником незбалансованості показано на рисунку 3. Магнетрон змонтовано в ізоляційному корпусі 13; 2 і 7 – електроди магнетронного розряду відповідно катод і анод. Конструкція магнет-



Рис. 2 – Інтегрований іонно-плазмовий пристрій

рону дозволяла без повного розбирання пристрою встановлювати на зовнішньому магнітному полюсі 4 дискові дискретні неодим-феррум-борові магнітні елементи 3. Загальний об'єм магнітів складав від 15,4 см³ до 23,1 см³. Об'єм магніту центрального полюсу 3 лишався незмінним – 5 см³.

В автономних випробуваннях максимальна електрична потужність розряду магнетрону досягла 2,5 кВт. Рівень незбалансованості магнітної системи магнетрону регулювався дискретно шляхом змінення кількості магнітів на зовнішньому магнітному полюсі. Максимальна густина іонного струму на катоді МРС становила 0,25 А/см². Максимальна густина потужності на катоді дорівнювала 100 Вт/см². Енергетична ефективність при розпиленні хрому становила 0,03 мг/В·А·хвил. Цей показник відповідав рівню, що було досягнуто в [16]. Вигляд ПЛН6МРС 50 показано на рисунку 4.

Досліджувалась можливість подальшого підсилення незбалансованості

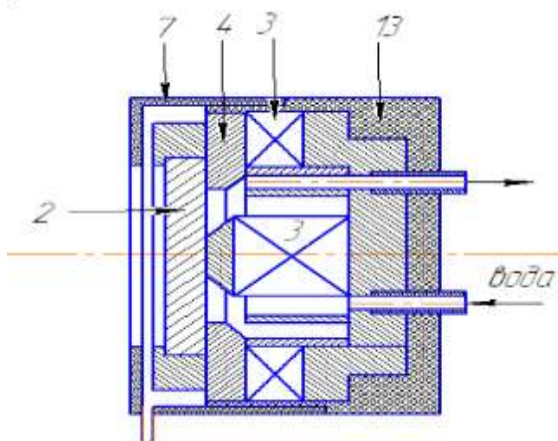


Рис. 3 – Конструктивна схема магнетрону ПЛН6МРС 50



Рис. 4 – Вигляд магнетрону ПЛН6МРС 50

МРС 50. З цією метою за межами вакуумної камери, концентрично МРС 50, монтувалася магнітна котушка. На рис. 5 показано конструктивну схему МРС 50 зі співвісною магнітною котушкою 5. На відміну від відомої конструкції МРС із зовнішньою котушкою, що обговорювалась в [17], котушка в нашій конструкції МРС 50 була укладена в магнітопровід 6. Зовнішнім магнітопроводом був корпус магнетрону 4. Постійні магніти центрального полюсу 3 виготовлені з матеріалу Nd-Fe-B. Така конструкція дозволяла істотно підвищити магнітну індукцію за зрізом магнетрону. Катод розряду 2, анодом і одночасно діафрагмою плазмового потоку слугувало кільце 7.

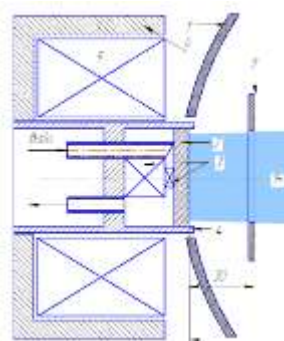


Рис. 5 – Схема МРС 50 з магнітною котушкою

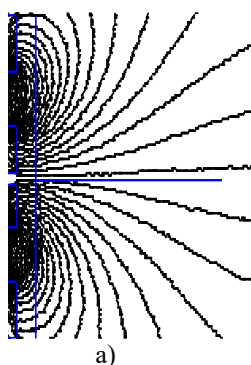


Рис. 6 – Вид газоплазмового потоку в МРС50

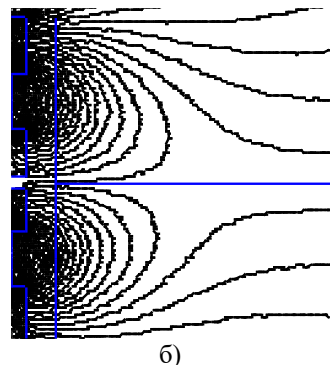
Застосування регульованої магнітної котушки дозволило здійснювати тонке налаштування картини магнітного поля за зрізом МРС і тим самим впливати на ступінь розльоту потоку плазми, тобто на ступінь локальності обробки.

На рис. 6 показано форму газоплазмового потоку, отриману при граничній несбалансованості магнітної системи ПЛНБМРС50 з магнітною котушкою. Видно, що діафрагма 7 не впливає на кут розльоту пучкової плазми.

На рисунку 7, а) зображено картину магнітних силових ліній в МРС при збалансованій магнітній системі. Рисунок 7, б) показує картину силових ліній при незбалансованості магнітної системи. Видно, що при розриві магнітних силових ліній незбалансованої електронної пастки форма магнітного поля сприяє виходу електронів за межі магнетронного розряду.



а) – збалансована магнітна система;



б) – гранично незбалансована магнітна система

Рис. 7 – Картина магнітного поля в МРС

На оброблювану поверхню подавався негативний потенціал електричного зміщення, що коригувало діаметр потоку плазми і забезпечувало обробку поверхні енергетичними іонами.

Результати випробувань МРС з магнітною котушкою продемонстрували можливість створення в МРС колімованого потоку плазми, необхідного для обробки обмеженої ділянки поверхні.

Отримані результати дозволили скорегувати напрям робіт зі створення і дослідження універсальної іонно-плазмової системи.

Аналіз потенційних можливостей універсальної іонно-плазмової системи і конкретизація задач її розробки і дослідження. Планарний магнетронний розпилювач ПлМРС50 зі збалансованою магнітною пасткою і з розрядом на постійному струмі створює потік електронейтральних атомних частинок розпиленого катодного матеріалу. Згідно з косінусним законом розльоту розпилених частинок потік матеріалу покриття має досить великий кут розльоту. Ефективне керування просторовою формою потоку можливе тільки при наявності у його частинок електричного заряду. Але в магнетронному розряді на постійному струмі є вкрай мало металевих іонів. До того ж вихід іонів за межі магнітної пастки обмежено в напрямі поперек магнітних силових ліній.

В магнетронній розпорошуючій системі існує три необхідні умови, одночасне виконання яких сприяє створенню колімованого потоку плазми і може дозволити регулювання кута розльоту потоку заряджених частинок:

1) – умова використання в магнетроні режиму потужнострумового імпульсно-періодичного магнетронного розряду (ПСІМР). При цьому доля металевих іонів в розряді істотно збільшується;

2) – умова створення конфігурації магнітних силових ліній, з виконанням якої з'являється можливість виходу плазми за межі магнітної пастки. Умови виходу створюються шляхом застосування незбалансованості магнітної системи магнетрону (див. рис. 7, б);

3) – умова існування на оброблюваній поверхні негативного електричного потенціалу зміщення.

Одночасне виконання цих умов перетворює МРС в універсальний плазмовий технологічний пристрій з функціями генератора колімованого потоку газометалевої плазми.

Очевидно, що такий спосіб формування колімованого потоку плазми може бути реалізовано тільки в технологічній системі обробки металевих виробів, тобто при можливості подачі на поверхню, що оброблюється, негативного потенціалу зміщення. При такому підключенні джерел живлення розрядів в проміжку між катодом магнетрону і поверхнею, що оброблюється, створюється подвійний розряд, симетричний відносно анода магнетрону. В межах магнітної пастки МРС реалізується розпилюючий магнетронний розряд із замкненим дрейфом електронів. В прикатодному просторі, біля поверхні оброблюваного виробу, буде існувати тліючий розряд, в приелектродному падінні якого іони отримують енергію, необхідну для виконання відповідних технологічних операцій обробки. При цьому поліпшуються умови нанесення наноструктурного покриття.

Суміщення в одній конструкції плазмового технологічного пристрою удосконалень, що описані вище, дозволило виключити автономне іонне джерело енергетичних газових іонів зі складу плазмового пристрою, що значно спростило його конструкцію і поліпшило його функціональність.

Імпульсне джерело живлення магнетронного розряду. Підвищену генерацію металевих іонів в розряді МРС забезпечує використання режиму ПСІМР. Концепцію ПСІМР було обґрунтовано в роботі [6]. Ідея ПСІМР полягає в тому, що при живленні магнетронного розряду уніполярними імпульсами підвищеної розрядної напруги, при тривалості імпульсів до 50 мілісекунд, в магнетроні може формуватися стійка форма квазістаціонарного розряду із густиною струму, яка значно перевищує значення, що досяж-

ні в стаціонарному режимі роботи МРС. Потужнострумові розрядні імпульси інтенсифікують процес іонного розпилення поверхні катоду. Крім того, висока густина імпульсного струму сприяє іонізації розпилених атомів матеріалу катода. Такий режим магнетронного розряду зближує магнетронний розряд з розрядом у ВДВ [4] за можливістю формування потоку газометалевої плазми.

Раніше нами було розроблено оригінальну схему імпульсного джерела живлення магнетронного розряду [12]. Вихідні характеристики цього джерела було локалізовано до вимог розпилення тільки металевих матеріалів. Таке обмеження дозволило істотно понизити вартість джерела живлення. Параметри джерела цілком влаштовували вимоги генерації потоку газометалевої плазми в магнетронній системі ПЛНБМРС 50.

Дослідний зразок джерела використовувався при дослідженнях і відпрацюванні технологічних режимів комплексної технології зміцнення. Джерело забезпечувало імпульсно-періодичний режим магнетронного розряду з регулюванням частоти розрядних імпульсів у діапазоні (1 – 10) Гц при тривалості імпульсів від 7 мс до 14 мс. Електрична потужність розряду в імпульсі коливалась від 6 кВт до 12 кВт. При підвищенні частоти імпульсів інтегральна потужність розряду падала. Падіння потужності розряду із зростанням частоти було викликано недостатньою потужністю зарядного джерела постійного струму, що було використано для зарядження накопичувального конденсатору джерела ПСІМР. Для зарядження конденсатору використовувалось джерело живлення стаціонарного магнетронного розряду МРС постійним струмом.

Дослідження характеристик розряду МРС в стаціонарному режимі розряду МРС. Технологічні властивості універсального плазмового пристрою обмежувалися характеристиками потоку частинок матеріалу покриття. Характеристики магнетронного пристрою досліджувались і порівнювались в стаціонарному і імпульсному режимах роботи.

На рисунку 8 показано зовнішній вигляд стаціонарного розряду ПЛНБМРС 50 без монтування зразка для обробки. Підтримувався такий режим розряду магнетрону: напруга розряду 500 В, струм розряду 2 А. Спостерігався характерний, витягнутий по вісі системи, вигляд розряду. Форма розряду свідчить про направлений характер потоку, що генерується, але сам потік плазми не формувався через відсутність оброблюваної поверхні під негативним потенціалом зміщення. На рисунку 9 показано вигляд потоку газометалевої плазми на поверхню зразка, що знаходилась під негативним потенціалом. Видно, що форма потоку плазми відповідає характерному розміру зразка – 40 мм.

Вольт-амперні характеристики стаціонарного магнетронного розряду знімалися при роботі в стаціонарному режимі МРС з графітовим катодом. При вимірюваннях тиск плазмоутворюючого газу в вакуумній камері складав 0,1 Па, 0,27 Па або 0,66 Па. Графіт використовувався для мінімізації впливу запилення ізоляторів зонду Ленгмюра. На рисунку 10 представлено вольт-амперні характеристики розряду МРС.



Рис. 8 – Розряд в ПЛН6МРС50.
Стационарний незбалансований режим



Рис. 9 – Потік плазми на зразок в незбалансованому режимі роботи ПЛН6МРС50

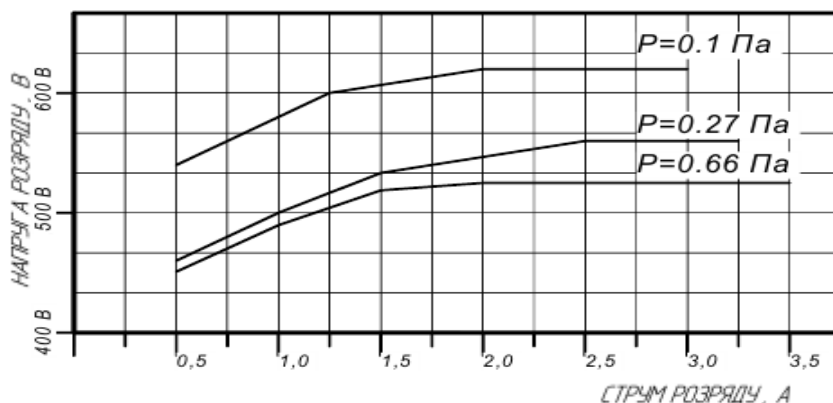


Рис. 10 – Вольт-амперні характеристики ПЛН6МРС50 в стаціонарному режимі розряду.

Видно, що при підвищенні тиску аргону і при підвищених напругах розряду струм розряду стабілізується. В цих режимах досягаються гранична для даної конструкції МРС густина струму на катод, що становила величину порядку $0,4 \text{ А/мм}^2$ і більше. Такі режими перспективні для технологічного застосування при попередньому іонному очищенні.

Дослідження розльоту потоку плазми в імпульсно-періодичному і стаціонарному режимах розряду МРС. Для підтвердження практичної ефективності використання імпульсного режиму МРС з граничною незбалансованістю магнітного поля проводилось порівняння характеристик імпульсно-періодичного і стаціонарного режимів роботи незбалансованої моделі ПЛН6МРС50.

Дослідження густини іонного струму на оброблювану поверхню і параметрів розльоту потоку плазми виконувались при роботі моделі МРС в одноімпульсному режимі при потужності розрядних імпульсів 12000 Вт ($400 \text{ В}/30 \text{ А}$).

Було визначено, що енергетична ефективність розпилення катода в стаціонарному і імпульсному режимах не залежить від потужності розряду. Так,

при розпиленні міді при обох режимах енергетична ефективність становила $0,135 \text{ мг/В} \cdot \text{А} \cdot \text{хвил.}$

На колекторі аналізатора характеристик плазми, при його площі 33 см^2 (діаметр колектору $6,5 \text{ см.}$), при віддаленні колектору від катоду МРС на 130 мм , вимірювалась маса осадку розпиленого матеріалу на колекторі. За 60 хвилин роботи МРС в стаціонарному режимі при потужності розряду 250 Вт на колекторі зформувалося покриття масою $67,4 \text{ мг}$.

В стаціонарному режимі покриття формується переважно з атомів розпиленого матеріалу. Показник зфокусованості потоку визначався як відношення маси осадку до енергетичного показника режиму – $[\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{хвил.}]$ (де В – напруга розряду, А – струм розряду). При роботі в стаціонарному режимі енергетичний показник дорівнював $0,0045 \text{ мг/В} \cdot \text{А} \cdot \text{хвил.}$ При роботі в імпульсному розряді аналогічний показник дорівнював $0,0085 \text{ мг/В} \cdot \text{А} \cdot \text{хвил.}$, тобто майже вдвічі перебільшував показник в стаціонарному режимі. Цей результат підтверджує істотно кращу зфокусованість потоку в імпульсному режимі.

Збільшення енергетичного показника в імпульсному режимі пояснювалося тим, що в імпульсному режимі на колекторі конденсуються як атомні частинки, так і металеві іони, які піддаються фокусуючому впливу незбалансованого електро-магнітного поля. Окрім того, як видно з рисунка 9, розльот плазмового потоку відповідає геометрії зразка, який знаходиться під негативним потенціалом і перехоплює всі іони з потоку плазми.

Радіальне розподілення густини іонного струму на колектор також може характеризувати ступінь зфокусованості потоку плазми. З цією метою виконувалися вимірювання іонного струму роздільно на всю поверхню колектору і на плоский струмовий зонд, який було змонтовано в площині колектору на його вісі. Середня густина іонного струму на вісі системи становила $0,1 \text{ А/см}^2$. Середня густина струму на всю площу колектору становила $0,06 \text{ А/см}^2$. Результат цих вимірювань також підтверджував граничну зфокусованість потоку газометалевої плазми на оброблювану поверхню.

Було визначено густину іонного струму і густину плазми в зоні обробки за Бомом. На поверхні при віддаленні колектору на 130 мм , на його вісі, густина плазми становила $2,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Середня по перерізу потоку густина плазми дорівнювала $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Визначення електронної температури в перерізі потоку виконувалось при обробці зондової характеристики згідно з методикою [18]. Було визначено, що електронна температура в області приелектродного падіння потенціалу, в області оброблення, складає приблизно 15 еВ , величина плаваючого потенціалу знаходиться в межах від 60 В до 67 В .

В імпульсному режимі роботи досліджувався зарядовий склад пучкової плазми (плазми газометалевого потоку). З літературних джерел відомо, що в режимі ПСІМР генеруються від 5% до 70% металевих іонів. Металеві іони виграють важливу роль у підвищенні якості покриття. Для визначення долі металічних іонів у перерізі оброблення нами було використано модифіковану методику [19]. Для вимірювань було використано трьохелектродний іонний аналізатор [18]. Для відсічки електронів від проникнення в порожнину аналізатора було використано дрібноструктурну сітку, на яку подавався негативний потенціал. Розмір клітинки сітки вибирався із умов $d < D$, де d – розмір клітинки, а D – радіус екранування Дебая. Геометрична прозорість сітки складала $0,326 \text{ мм}$. Для визначення долі металевих іонів в пучковій газомета-

лівій плазмі на колекторі аналізатора реєструвалася маса осадку матеріалу покриття.

Струм на колектор аналізатора визначається потоком газових і металевих іонів. Доля металевих іонів визначалась шляхом порівняння маси осадку на колектор при позитивному й негативному потенціалі на колекторі. При негативному потенціалі (-60 В) на колекторі конденсуються іони й нейтральні атоми металу. Позитивний потенціал на колекторі (+ 60 В) перешкоджає конденсації металевих іонів. Порівняння значень струмів дозволило визначити долю металевих іонів в нашому експерименті. Вона дорівнювала 43 %. В імпульсному режимі густина струму іонів асистування становила 0,18 А/см², що може задовільняти вимогам технології іонної обробки і нанесення наноструктурного покриття.

Оцінки параметрів плазми в універсальному магнетронному пристрої показали, що параметри плазми задовільняють вимоги всіх технологічних переходів зміцнюючої іонно-плазмової технології.

Досліджувався ступінь розльоту потоку плазми в просторі за зрізом незбалансованої магнетронної системи. Для визначення радіального розподілення іонного струму використовувався координатний пристрій, що дозволяв переміщувати струмовий зонд Ленгюра в поперечних перерізах простору на різному віддаленні від катода магнетрону. Використовувався зонд з прийомною поверхнею 1,5 см². Зонд переміщувався вздовж вісі системи на відстані від катода від 50 мм до 310 мм. В поперечному перетині потоку переміщення зонду забезпечувалося в межах ± 160 мм відносно вісі потоку. Незбалансована магнетронна система ПЛН6МРС 50 працювала в стаціонарному режимі 500 В/0,5 А.

Виконувалось завдання встановлення характеристики спрямованості потоку плазми за межами магнетронної системи. Було отримано радіальні профілі густини плазми в п'яти перетинах потоку на різних віддаленнях від розряду магнетрону. Картину розподілення представлено на рисунку 11.

В потоці плазми знімалися зондові характеристики на вісі потоку і в периферійних областях, в яких передбачалася мінімальна густина плазми. Густина зондового струму на вісі потоку змінювалась від 1,5 мА/см² на відстані 50 мм від катода МРС до 0,23 мА/см² на відстані 310 мм.

Визначалась густина плазми. На вісі потоку на відстані 50 мм від катода густина плазми становила $3,3 \cdot 10^7$ см⁻³. Згадаємо, що в цьому перерізі середня густина плазми при роботі МРС в імпульсному режимі становила $4 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Густина плазми в стаціонарному режимі при віддаленні від катода на 310 мм і на периферії складала тільки $5 \cdot 10^6$ см⁻³. Було визначено, що в стаціонарному режимі електронна температура в плазмі потоку знаходиться в межах від 8 еВ до 10 еВ.

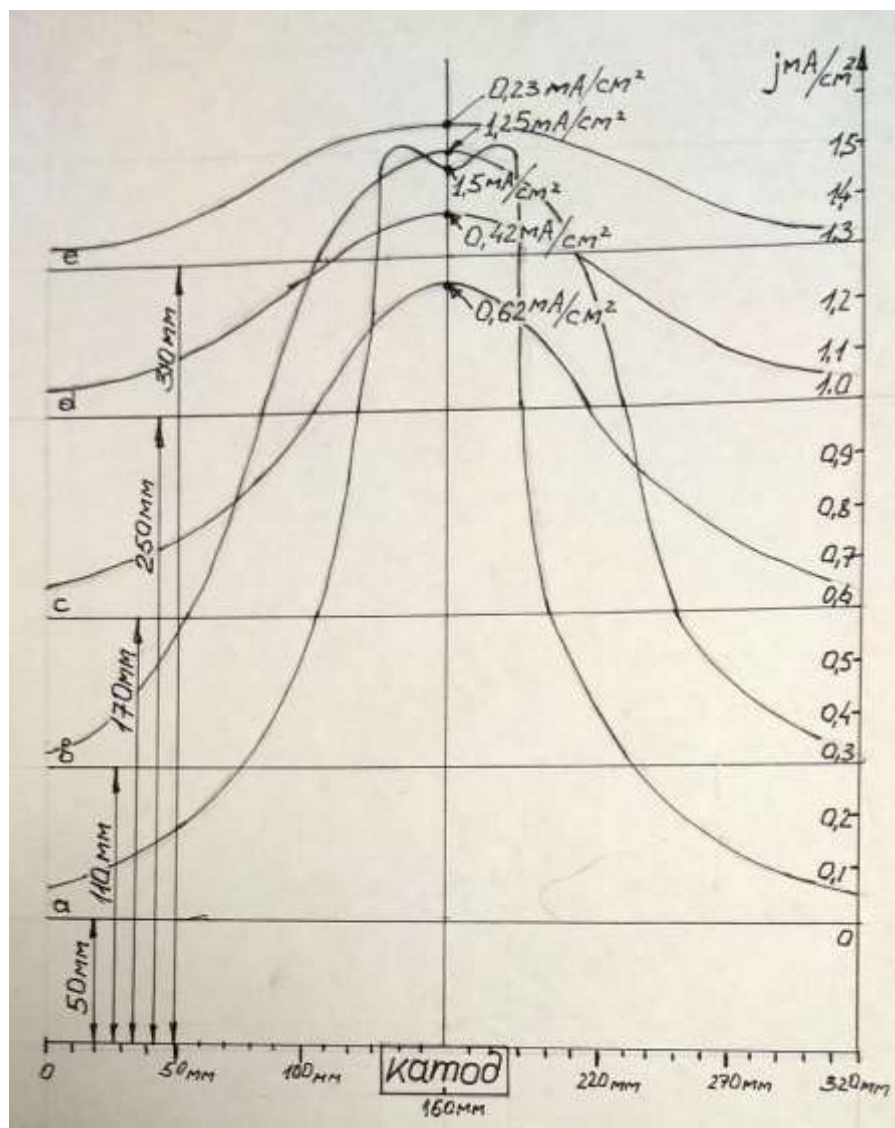


Рис. 11 – Розподілення густини іонного струму на плоский зонд в газовій плазмі потоку, що генерується магнетроном ПЛН6МРС50 в стаціонарному режимі.

Виходячи з твердження про косінусний характер розльоту розпиленних частинок в збалансованій МРС і спираючись на результати вимірювань радіальних розподілень густини іонного струму за зрізом ПЛН6МРС 50 (див. рис. 11) можна стверджувати, що кут розльоту газометалевої плазми має бути істотно менший, ніж кут розльоту за косінусним законом. Цей факт підтверджує можливість збереження колімованості газометалевого потоку на відстані принаймні до 300 мм від МРС.

Оцінка технологічних можливостей універсального пристрою для комплексної обробки. Для проведення комбінованої зміцнюючої іонно-плазмової обробки поверхні зазвичай виконується така послідовність технологічних операцій.

На першому етапі обробки, при роботі незбалансованої МРС в слабко-струмовому режимі розряду на постійному струмі газові іони аргону витягуються потенціалом зміщення з магнетронного розряду і бомбардують поверхню, що обробляється, з енергією, яка необхідна для виконання операції іонної очистки. Енергія іонів визначається напругою зміщення. Одночасно з іонною очисткою відбувається нагрів зразка.

Після операції очистки подачу аргону в камеру зменшують або припиняють. В вакуумну камеру подається азот, і виконується операція азотування поверхні іонною імплантацією. Енергія іонів азоту, густина струму іонів азоту і температура поверхні, що оброблюється, регулюються у відповідності до умов отримання необхідних параметрів зміцнення поверхні.

На третьому етапі обробки подачу азоту припиняють і відкривають подачу аргону. Вмикається імпульсно-періодичний режим магнетронного розряду МРС. Відбувається розпорошення катода магнетрону і нанесення покриття. Задля іонного асистування процесу конденсації густину струму на поверхню встановлюють на рівні до 5 мА/см^2 . Ступінь незбалансованості магнітної системи МРС встановлюється у відповідності до характерного розміру поверхні обробки регулюванням струму магнітної котушки. Регулювання важливого технологічного параметра – температури поверхні, відбувається регулюванням густини струму іонів і напруги електричного зміщення і коригується автономним резистивним нагрівачем.

В пристрої з ПЛНБМРС50, що працює в стаціонарному режимі, була випробувана технологія обробки енергетичним потоком газової енергетичної плазми (азотування). Зразок полірованої листової нержавіючої сталі 12Х18Н9Т товщиною 2 мм і розміром $40 \text{ мм} \times 40 \text{ мм}$ монтували на вісі МРС на відстані 100 мм від катода МРС. Виконувалась обробка за схемою «попереднє іонне очищення – нагрів – іонне азотування». При режимі стаціонарного магнетронного розряду в МРС – 450 В/0,5 А – на зразок подавалось негативне електричне зміщення 2000 В. При цьому густина струму іонів аргону на зразок становила $(10 - 12) \text{ мА/см}^2$. За 5 хвилин зразок очищався іонним бомбардуванням і нагрівався до температури 600°C без допомоги автономного нагрівача.

Процес азотування виконувався за технологією високоінтенсивної низькоенергетичної іонної імплантації [20]. Під час імплантації напруга зміщення становила 1200 В, густина іонів азоту на зразок підтримувалась на рівні 5 мА/см^2 на протязі 60 хвилин. Температура поверхні підтримувалась в межах від 400°C до 480°C . Інтегральна доза іонів азоту на поверхню (флюєнс) становила від 10^{19} см^{-2} до 10^{20} см^{-2} . Після обробки й охолодження зразок видалявся з вакуумної камери.

Зовнішній огляд поверхні обробки показав, що після обробки шорсткість полірованої поверхні погіршилась. Шорсткість поверхні зразка поліпшили незначним механічним шліфуванням і поліруванням, що було необхідно для проведення заміру мікротвердості на приладі ПМТ-3. Вимірювання мікротвердості обробленої поверхні показало, що мікротвердість після іонного азотування значно підвищилась і становила 11 ГПа. Результат свідчив про ефек-

тивність азотування в режимі високоінтенсивної низькоенергетичної іонної імплантації. Більш докладні дослідження цього процесу не проводилися. Для продовження відпрацювання технологічних процесів необхідне відпрацювання процесу іонної обробки для вирішення питання небажаного погіршення шорсткості поверхні. Другий етап обробки нанесенням наноструктурного покриття також не проводився. Процес іонно-плазмового нанесення наноструктурного хромового покриття раніше нами було відпрацьовано на пристрої ПЛН6МРС [9, 15].

1. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
2. Сулима В. А., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Бойцов А. Г., Машков Н. В., Смоленцев В. Л. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
4. Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А. и др. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. Киев: Наукова думка, 2012. 727 с.
5. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
6. Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В. Экспериментальное исследование сильноточных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле. Физика плазмы. 1995. Т. 21, № 5. С. 422–433.
7. Ehiasarian A. P., Wen J. G., Petrov I. Interface microstructure engineering by high power impulse magnetron sputtering for the enhancement of adhesion. Journal of Appl. Physics. 2007. 101. 054301. <https://doi.org/10.1063/1.2697052>
8. Виноградов М. И. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
9. Гришкевич А. Д., Гринюк С. И. Магнетронное формирование и применение интенсивных потоков газометаллической плазмы. Технічна механіка. 2019. № 2. С. 102–112. <https://doi.org/10.15407/itm2019.02.102>
10. Свадковский И. В. Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
11. Белый А. В., Кукареко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 205 с.
12. Гришкевич А. Д., Гринюк С. И. Разработка и исследование макета низкочастотного источника питания сильноточного импульсного магнетронного разряда. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 137–147. <https://doi.org/10.15407/itm2019.04.137>
13. Кадыржанов К. К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: изд. МГУ, 2005. 640 с.
14. Гришкевич А. Д. Цилиндрическая магнетронная распылительная система с ионным ассистированием. Техническая механика. 2013. № 2. С. 109–114.
15. Гришкевич А. Д., Гринюк С. И., Коваленко В. В. и др. Технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Разработка и применение. Техническая механика. 2013. № 4. С. 43–57.
16. Рогов А. В., Капустин Ю. В., Мартыненко Ю. В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации. ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 2. С. 126–134. <https://doi.org/10.1134/S1063784215020206>
17. Соловьев А. А., Сочугов Н. С., Осомов К. В. и др. Исследование характеристик плазмы несбалансированной магнетронной распылительной системы. Физика плазмы. 2009. Т.35, № 5. С. 443–452. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09050055>
18. Еришов А. П. Метод электрических зондов Ленгмюра. М.: Физический факультет МГУ. 2007. 26 с.
19. Poolcharuansin P., Bowes M., Petty T. J., Bradley J. W. Ionized metal flux fraction measurements in HiPIMS discharges. Journal of Phys. D: Appl. Phys. 2012. 45. P. 1–5. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/32/322001>
20. Белый А. В. и др. Инженерия поверхности конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. Минск: Беларуская навука, 2017. 457 с.

Отримано 25.05.2020

в остаточному варіанті 25.06.2020