

Володимир Іванович Мірненко (д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри)¹

Олег Віталійович Радько (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри)¹

Анатолій Кирилович Скуратовський (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри)²

¹*Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна*

²*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна*

ВАКУУМНЕ АЗОТУВАННЯ У ПУЛЬСУЮЧОМУ ПУЧКУ ПЛАЗМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В статті, на підставі проведених експериментальних досліджень, запропоновано технологічний процес вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми, при якому, завдяки поєднанню переваг використання пульсуючого струму та газотермічних циклів насичення поверхневих шарів деталей азотом, значно скорочено час дифузійного насичення, витрати електроенергії та реакційних газів, підвищено безпеку та якість обробки деталей. Встановлено, що застосування розробленого технологічного процесу на етапах створення та ремонту двигунів внутрішнього згорання військової техніки забезпечить зменшення швидкості ізотермічної і термоциклічної повзучості їх деталей з алюмінієвих сплавів у 1,8...2,2 рази.

Ключові слова: вакуумне азотування у пульсуючому пучку плазми, двигуни внутрішнього згорання військової техніки, ізотермічна та термоциклічна повзучість.

Постановка проблеми. Потреба у забезпеченні високого рівня експлуатаційних властивостей та надійності двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) військової техніки (ВТ), зокрема, автомобільної та бронетанкової, робить актуальною задачу розробки нових та удосконалення існуючих технологій поверхневого зміцнення їх деталей, активного впровадження цих методів у виробництво.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення ДВЗ ВТ пов'язане з постійним зростанням значень їх експлуатаційних характеристик: тиску в камері згорання, числа обертів колінчастого валу, питомої потужності на одиницю маси двигуна тощо. Це призводить до постійного підвищення робочих температур конструкційних елементів двигуна, особливо деталей циліндропоршнєвої групи, зокрема поршнів, які, по суті, є "серцем" ДВЗ і значною мірою визначають його ресурс. Вплив високих температур на поршень, у свою чергу, викликає зниження його міцності, зносостійкості і довговічності.

Необхідність забезпечення вимог щодо високої питомої міцності ДВЗ та малої питомої ваги його конструкційних елементів зумовила широке застосування в двигунобудуванні алюмінієвих сплавів. Проте великим недоліком цих матеріалів є їхня низька теплостійкість. Через цю обставину рівень форсування сучасних ДВЗ досяг межі можливості.

Відомим методом підвищення теплостійкості головок поршнів ДВЗ є тверде анодування [1]. Основний недолік цього методу обробки, як і у більшості покриттів, полягає в їх розтріскуванні і відшаровуванні в умовах експлуатації. До того ж,

тверде анодування є шкідливим і екологічно небезпечним процесом.

У зв'язку з цим, розробка комплексу науково-обґрунтованих технологічних рішень щодо використання нових методів поверхневого зміцнення для підвищення теплостійкості деталей з алюмінієвих сплавів ДВЗ ВТ на етапах їх створення та ремонту є актуальною науковою задачею в галузі двигунобудування.

Враховуючи це **метою статті** є підвищення теплостійкості деталей з алюмінієвих сплавів ДВЗ ВТ шляхом застосування технологічного процесу вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Перспективним методом поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів вважається іонне азотування [2, 3]. У роботі пропонується використовувати нову технологію газотермоциклічного (ГТЦ) вакуумного азотування [4] алюмінієвих сплавів у пульсуючому пучку плазми. При такій організації процесу відбувається поєднання переваг подавання на вхід вакуумної установки для азотування пульсуючого струму з високою напругою та періодичного чередування циклів насичення та розсмоктування азоту як по насичуючій здатності атмосфери, так і по температурі [5].

Відомо, що кінетична енергія зарядженої частки (електрону або іону) є прямо пропорційною величині падіння потенціалу, яка припадає на довжину вільного пробігу цієї частки. Однак необмежене збільшення цієї величини може призвести до переходу тліючого розряду у дуговий та, як наслідок, до оплавлення деталі, що підлягає обробці. Проте експериментальними

дослідженнями впливу імпульсів високого струму на плазму тліючого розряду встановлено, що при тривалості імпульсу до декількох мікросекунд газорозрядний проміжок здатний витримувати напругу, яка значно перевищує напругу стаціонарного розряду, ще не призводячи до дугового пробою. Отже, збільшуючи напругу на полюсах установки до 1000...1200 В (замість 300...400 В при вакуумному азотуванні з подаванням постійного струму), ми значно підвищуємо ступінь аномальності тліючого розряду, збільшуємо енергію позитивних іонів азоту, які бомбардують поверхню деталі-катоду. Це призводить до збільшення швидкості та глибини дифузійного насичення деталей азотом.

Технологічний процес зміцнення деталей ГТЦ вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми складається з певної послідовності дій, яка включає в себе підготовчі операції, безпосередньо проведення вакуумного азотування та завершальні операції.

Підготовчі операції включають:

1. Очищення камери та обладнання за допомогою авіаційного гасу.
2. Очищення деталей від іржі, окалин тощо.
3. Знежирювання поверхні деталей за допомогою авіаційного гасу або уайтспіриту.
4. Монтаж деталей у вакуумну камеру за допомогою спеціального обладнання.

Безпосередньо вакуумне азотування у пульсуючому пучку плазми складається з трьох стадій: катодного очищення деталі, дифузійного насичення поверхні та охолодження. Воно включає наступні послідовні операції:

1. Відкачування повітря до розрідження 5 Па.
2. Продувка вакуумної камери робочою сумішшю протягом 5 – 15 хв. при тиску 1500 Па.
3. Повторне відкачування суміші до розрідження 1,33 Па.
4. Подача на електроди напруги (деталь – катод, стінки камери – анод) та збудження тліючого розряду та іонне очищення деталі катодним розпиленням при напрузі 500 – 1100 В.
5. Зниження напруги до робочої. Встановлення необхідного робочого тиску суміші (10-20 Па).
6. Проведення дифузійного насичення поверхні деталі у тліючому розряді в імпульсному режимі.

Ефект від періодичного чередування циклів насичення при проточному азотуванні та розсмоктування азотованого шару при максимально можливому зниженні насичуючої здатності атмосфери в умовах циклічної зміни температури досягається за рахунок впливу на фактор, який у значній мірі визначає швидкість насичення – коефіцієнт дифузії. Цей коефіцієнт, як відомо, залежить від температури та градієнту концентрації. Отже, за рахунок термоциклів можливо не тільки прискорювати процес дифузійного насичення, а й контролювати його.

Температурний діапазон термоциклів визначено у відповідності з діаграмою алюміній – азот. Діаграма має критичні точки, які

відокремлюють області з різним фазовим складом. За рахунок підбирання значень температур відбуваються циклічні фазові перетворення. Ці перетворення призводять до зменшення розмірів зерна та збільшення дифузійних переміщень. При цьому одночасно можуть існувати дві та більше фази з різними будовами кристалічних ґраток та різними об'ємами. Одночасно збільшується протяжність границь, отже, відповідно, і активність граничної дифузії.

Відповідно до викладеного вище, на першому півциклі процесу (стадія дифузійного насичення) відбувається азотування при проточному подаванні робочої суміші газів у вакуумну камеру установки. При цьому поверхня деталі насичується азотом з утворенням нітридної зони. Згідно з законом дифузії Фіка найбільш активно процес протікає перші 15...30 хвилин. Для максимального використання тільки найбільш активних періодів дифузійного процесу, саме цей час і було обрано у якості тривалості півциклів насичення та розсмоктування азотованого шару. Такий підхід призводить до значного підвищення швидкості формування дифузійного шару.

Далі, на другому етапі (стадія розсмоктування) подачу робочої суміші газів припиняють. При цьому відбувається її дисоціація, а азотний потенціал падає практично до нуля. Оскільки нітридна зона складається з метастабільних фаз, у яких азот є активним та здатним до дифузії, створюється високий градієнт концентрації на межі нітридної зони та зони внутрішнього азотування. Починається процес вирівнювання концентрацій, при якому дифузія азоту відбувається переважно вглибину деталі, яка підлягає обробці. Процес формування азотованого шару значно прискорюється.

7. Відключення тліючого розряду та охолодження деталей у вакуумній камері.

Завершальні операції включають:

1. Вилучення деталі з камери.
2. Термічна обробка (якщо необхідно).

Блок-схема алгоритму розробленого технологічного процесу ГТЦ вакуумного азотування алюмінієвих сплавів в пульсуючому пучку плазми та контролю параметрів на різних його етапах наведено на рис. 1.

На етапі катодного очищення контролюється температура розігріву деталі T_d та час очищення. Якщо протягом 5 – 20 хв. деталь не нагрівається до температури $T_d = 200$ °С, то на 30...40 В збільшують напругу, яка подається на установку, знову вимірюють температуру та приймають рішення щодо необхідності подальшого збільшення напруги – і так рухаються за циклом. Якщо ж T_d перебільшує 350°С – на 5...10 Па зменшують тиск у вакуумній камері, вимірюють температуру та приймають рішення щодо необхідності подальшого зменшення тиску.

На етапі дифузійного насичення контролюється температура розігріву деталі T_d та час насичення.

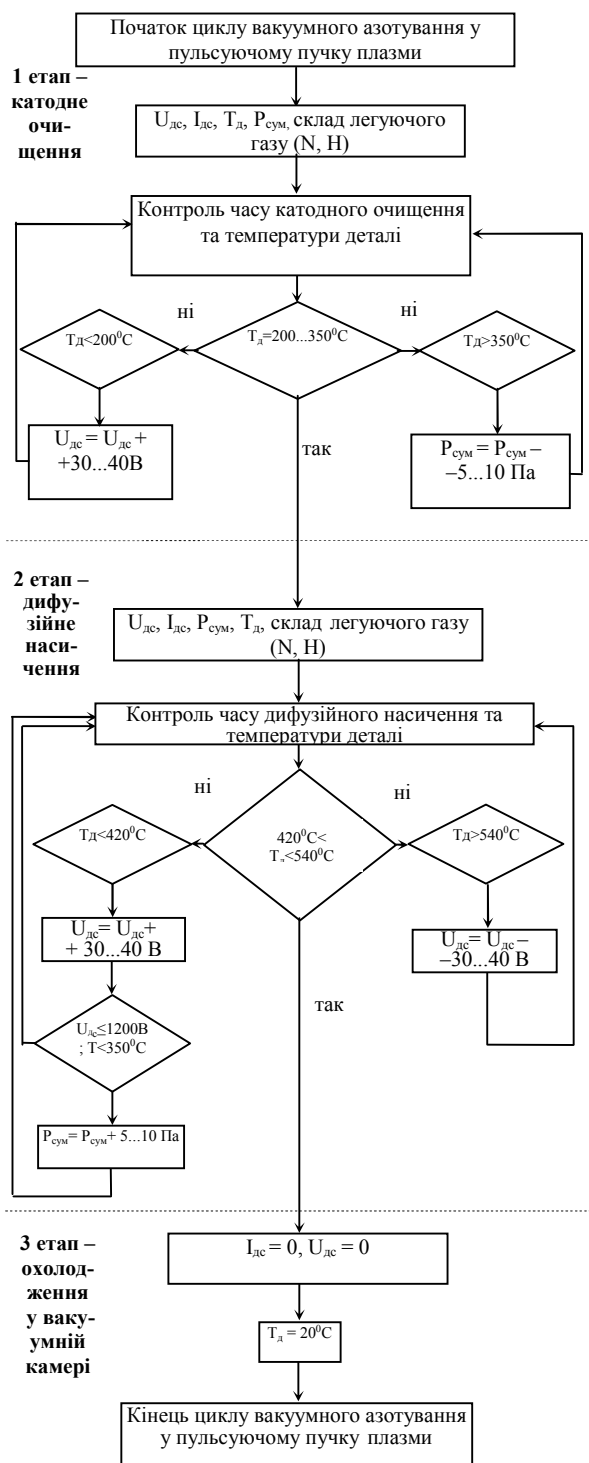


Рис.1. Блок-схема алгоритму вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми

Якщо T_d перебільшує 540°C – на $30..40\text{В}$ зменшують напругу, яка подається на катод, знову вимірюють температуру та приймають рішення щодо необхідності подальшого зменшення напруги – і так рухаються за циклом. Якщо ж температура деталі T_d стає меншою за 420°C то на $30..40\text{В}$ збільшують напругу, яка подається на катод, знову вимірюють температуру та приймають рішення щодо необхідності

подальшого збільшення напруги – і так за циклом. У разі, коли напругу підвищено до 1100В , а температура T_d залишається меншою за 420°C – на $5..10\text{Па}$ підвищують тиск у вакуумній камері, вимірюють температуру та приймають рішення щодо необхідності подальшого підвищення тиску. На етапі охолодження у вакуумній камері контролюють температуру деталі; наприкінці етапу T_d має бути близько кімнатної.

Безпосередньо процес вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми проводили за допомогою установки ВПА-1 [6]. Загальний вигляд поршнів ДВЗ до та після іонноазотуючої обробки зображено на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд поршнів двигунів внутрішнього згорання: 1 – без обробки; 2 – після вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми

Після вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми зразків з алюмінієвого сплаву АЛ21 було проведено комплекс порівняльних експериментальних досліджень цих зразків (як без обробки, так і зі зміцненим поверхневим шаром), в результаті чого отримано криві повзучості та встановлено вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів на ізотермічну та термоциклічну повзучість.

На рис. 3 наведено криві ізотермічної повзучості, а на рис. 4 криві термоциклічної повзучості.

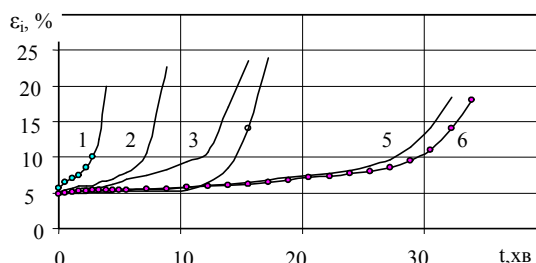


Рисунок 3. Криві ізотермічної повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21: 1 – (без обробки) при $T = 690^{\circ}\text{C}$; 2 – при $T = 710^{\circ}\text{C}$; 3 – при $T = 590^{\circ}\text{C}$; 4 – при $T = 680^{\circ}\text{C}$; 5 – при $T = 610^{\circ}\text{C}$; 6 – при $T = 580^{\circ}\text{C}$

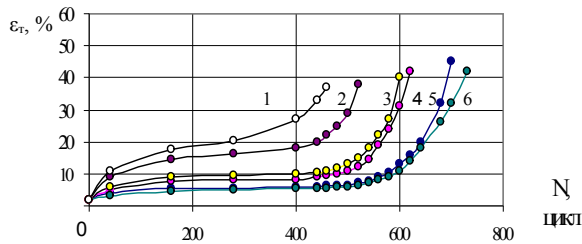


Рисунок 4. Криві термоциклічної повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21: 1 – (без обробки) при $T=680...470^{\circ}\text{C}$; 2 – при $T=690...480^{\circ}\text{C}$; 3 – при $T=610...410^{\circ}\text{C}$; 4 – при $T=600...390^{\circ}\text{C}$; 5 – при $T=560...360^{\circ}\text{C}$; 6 – при $T=530...330^{\circ}\text{C}$

На основі аналізу отриманих кривих ізотермічної та термоциклічної повзучості встановлено, що:

- вид кривих повзучості залежить від температури та умов її впливу на композицію “основа-покриття”;

- криві ізотермічної та термоциклічної повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами мають чітко виражені три ділянки повзучості, причому, в залежності від температури, тривалість їх різна. Це зумовлено наявністю у поверхневому шарі зміцнюючої фази АІN, рівномірним розподілом компонентів покриття по поверхні й ступінем їх тугоплавкості. З цим пов’язано ускладнення руху дислокацій, які на своєму шляху зіштовхуються з необхідністю долати великі перепони, що викликані наявністю зміцненого шару;

- час до руйнування при термоциклічному режимі випробувань менший, ніж при ізотермічному;

- величина швидкості повзучості має кореляційний зв’язок із твердістю теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів та залежить від їх товщини;

- у процесі повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами спостерігається два конкуруючих процеси: зміцнення внаслідок пластичної деформації та знеміцнення під впливом підвищеної температури;

- незважаючи на різний склад теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів, опір ізотермічній та термоциклічній повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21 підвищився в 1,8...2,2 рази.

Висновки й перспективи подальших досліджень. 1. На підставі експериментальних досліджень розроблено технологічний процес ГТЦ вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми, при якому, завдяки поєднанню переваг використання пульсуючого струму та газотермічних циклів насичення поверхневих шарів деталей азотом, значно скорочено час дифузійного насичення, витрати електроенергії та реакційних газів, підвищено безпеку та якість обробки деталей.

2. Встановлено, що застосування розробленого технологічного процесу на етапах створення та ремонту ДВЗ ВТ забезпечить зменшення швидкості ізотермічної і термоциклічної повзучості їх деталей з алюмінієвих сплавів у 1,8...2,2 рази.

3. Перспективою подальших досліджень проведення робіт щодо визначення можливостей застосування технологічного процесу ГТЦ вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми для широкої номенклатури конструкційних матеріалів, з яких виготовляють деталі військової техніки.

Література

1. **Ляшенко Б. А.,** Соловых Е. К., Мирненко В. И. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости //ИПП им. ГС Писаренко НАНУ,-Киев—2010.—193 с. – 2010.

2. **Afonso, A.** Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application [Text] / A. Afonso, G. Ferran, F. Chi // SAE Techn. Pap. Ser. – 1991. – №910632. – p. 1-9.

3. **Yamaguchi Hiroshi.** Technology of hard anodization and test of coating //Intern. Combust. Engine.–1990. – 2009, №12. – p. 57-62.

4. **Пат. 10014 Україна,** МПК 7 C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І., Радько О.В.; Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.

5. **Триботехнічні** властивості зміцнених газотермоциклічним іонним азотуванням сталевих деталей авіаційної техніки / Б. А. Ляшенко, В. І. Мірненко, А. К. Скураговський, О. В. Радько // Наукові вісті національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2007. – № 5. – С. 98-102.

6. **Впровадження** технології підвищення питомої потужності автотракторних двигунів за рахунок застосування поршнів з теплозахисними покриттями, отриманими за допомогою енергозберігаючої технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми: Звіт про НДР (заключний) / ПІМ ім. Г.С.Писаренко НАН України. – Інв. № 00574. – К., 2006. – 159 с.

**ВАКУУМНОЕ АЗОТИРОВАНИЕ В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПУЧКЕ ПЛАЗМЫ
КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Владимир Иванович Мирненко (д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой)¹

Олег Витальевич Радко (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры)¹

Анатолий Кириллович Скуратовский (канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры)²

¹*Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина*

²*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина*

В статье, на основании проведенных экспериментальных исследований предложен технологический процесс вакуумного азотирования в пульсирующем пучке плазмы, при котором, благодаря сочетанию преимуществ использования пульсирующего тока и газотермических циклов насыщения поверхностных слоев деталей азотом, значительно сокращено время диффузионного насыщения, расходы электроэнергии и реакционных газов, повышены безопасность и качество обработки деталей. Установлено, что применение разработанного технологического процесса на этапах создания и ремонта двигателей внутреннего сгорания военной техники обеспечит уменьшение скорости изотермической и термоциклической ползучести их деталей из алюминиевых сплавов в 1,8 ... 2,2 раза.

Ключевые слова: вакуумное азотирования в пульсирующем пучке плазмы, двигатели внутреннего сгорания военной техники, изотермическая и термоциклической ползучесть.

VACUUM NITRIDING IN PULSATING PLASMA BEAM OF MILITARY EQUIPMENT STRUCTURAL ELEMENTS FROM ALUMINUM ALLOY

Volodymyr I. Mirnenko, (Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the chair)¹

Oleg V. Radko (Ph.D., Docent, Docent at the chair)¹

Anatoliy K. Skuratovsky (Ph.D, Docent, Docent at the chair)²

¹*The National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".*

Abstract: In the article, based on the experimental studies carried out, a technological process of vacuum nitriding in a pulsating plasma beam is suggested, in which, due to the combination of the advantages of using a pulsating current and gas-thermal cycles of saturation of the surface layers of parts with nitrogen, the time of diffusion saturation, the expenditure of electricity and reaction gases, and the quality of the processing of parts. It is established that the application of the developed technological process at the stages of creation and repair of internal combustion engines of military equipment will ensure a reduction in the rate of isothermal and thermocyclic creep of their parts from aluminum alloys by 1.8 ... 2.2 times. It is determined that the prospect of further research is to determine the possibilities of using the technological process of gas-thermocyclic vacuum nitriding in a pulsating plasma beam for a wide range of structural materials, of which parts of military equipment are manufactured.

Keywords: vacuum nitriding in a pulsating plasma beam, internal combustion engines of military equipment, isothermal and thermocyclic creep.

References

1. Liashenko B. A., Solovykh E. K., Myrnenko V. Y. Optymyzatsiya tekhnolohyy nanesenya pokrytyi po kryteriyam prochnosti y yznosostoikosti //YPP ym. HS Pysarenko NANU,-Kyev—2010.—193 s. – 2010.
2. Afonso, A. Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application [Text] / A. Afonso, G. Ferran, F. Chi // SAE Techn. Pap. Ser. – 1991. – №910632. – p. 1-9.
3. Yamaguchi Hiroshi. Technology of hard anodization and test of coating //Intern. Combust. Engine.–1990. – 2009, №12. – p. 57-62.
4. Pat. 10014 Ukraine, MPK 7 S23S 8/06. Sposib poverkhnovoho zmitsnennia stalevykh detalei ionno-plazmovym azotuvanniam u pulsuiuchomu tliiuchomu rozriadi: Liashenko B.A., Rutkovskiy A.V., Mirnenko V.I,

Radko O.V.; Natsionalna akademiia oborony Ukrainy. – # 19782; Zaiavl. 19.09.06; Opubl. 15.12.06, Biul. #12 – 5 s.

5. Trybotekhnichni vlastyosti zmitsnennykh hazotermotsyklichnym ionnym azotuvanniam stalevykh detalei aviatsiinoi tekhniki / B. A. Liashenko, V. I. Mirnenko, A. K. Skuratovskiy, O. V. Radko // Naukovi visti natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". – 2007. – # 5. – S. 98-102.

6. Vprovadzhennia tekhnolohii pidvyshchennia pytomoj potuzhnosti avtotraktornykh dvyhuniv za rakhunok zastosuvannia porshniv z teplozakhysnymy pokryttiamy, otrymanymy za dopomohoiu enerhozberihaiuchoi tekhnolohii vakuumnoho azotuvannia v pulsuiuchomu puchku plazmy: Zvit pro NDR (zakliuchnyi)/ IPM im. H.S.Pysarenko NAN Ukrainy. – Inv. # 00574. – K., 2006. – 159 s.