

УДК 621.646: 62-83

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ****Соколов В.І., Степанова О.Г., Батурін Є.О.****RESEACH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR
ELECTROHYDRAULIC DRIVE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT****Sokolov V., Stepanova O, Baturin Y.**

Запропоновано математичні моделі динамічних характеристик автоматичного електрогідравлічного приводу з об'ємним регулюванням технологічного обладнання. Представлені структурні схеми математичних моделей обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкта автоматичного управління. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень динамічних характеристик електрогідравлічного приводу. Виконано перевірку адекватності розроблених математичних моделей.

Ключові слова: насос, гідромотор, об'ємне регулювання, передавальна функція, структурна схема, перехідний процес.

Постановка проблеми. Розширення функціональних можливостей та підвищення ефективності технологічного обладнання, зокрема, обладнання для механічної обробки матеріалів, може бути досягнуто розробкою та застосуванням систем автоматичного керування [1-5]. Досягнення довільної кінематики робочого органу, можливості програмної реалізації оптимальних законів його руху забезпечується застосуванням гідроприводів, зокрема, автоматичних електрогідравлічних приводів (ЕГП) з об'ємним регулюванням в обладнанні потужністю понад 8 кВт [6-10]. Застосування гідроприводу в технологічному обладнанні дозволяє спростити кінематику верстатів, знизити металоємність, підвищити точність, надійність та рівень автоматизації. Широке використання гідроприводів визначається рядом їхніх істотних переваг перед іншими типами приводів і, перш за все, можливістю отримання великих зусиль та потужностей при обмежених розмірах гідродвигунів. Гідроприводи забезпечують широкий діапазон безступінчастого регулювання швидкості, можливість роботи в динамічних режимах з необхідною якістю перехідних процесів, а також захист системи від перевантаження та точний контроль діючих зусиль [11-14].

У зв'язку з цим актуальним завданням для синтезу і дослідження систем автоматичного управління є розробка достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в ЕГП та враховують особливості технологічного призначення обладнання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика математичного моделювання характеристик автоматичних ЕГП технологічного обладнання досить широко представлена в літературі [4, 6-8, 15]. Дослідження робочих процесів в обладнанні засноване на фундаментальних рівняннях гідромеханіки, механіки твердого тіла та електротехніки [16-18]. Для дослідження стійкості та якості регулювання таких систем, їх коригування застосовують методи теорії автоматичного керування та регулювання [1-3, 19].

При математичному моделюванні динамічних характеристик гідроприводів технологічного обладнання виникають певні труднощі з описом нестационарних гідромеханічних процесів, що протікають в них [7, 12, 20-21]. В динаміці гідросистем є особливості, зумовлені взаємодією гідравлічних елементів, а також наявністю руху робочого середовища по трубопроводах, щілинах та каналах з місцевими опорами. Крім процесів, що виникають при виконанні системами запланованих операцій в гідроприводі, мають місце коливання тиску, витрат, окремих деталей внаслідок стисливості робочого середовища, впливу робочого середовища на регулюючі пристрої, витоку по зазорам та інших причин [3, 14, 16]. Поєднання всіх цих явищ призводить до складних нестационарних гідромеханічних процесів, які необхідно враховувати при проектуванні технологічного обладнання з гідроприводом [6, 22-25].

Разом з тим, розширення функціональних можливостей та підвищення ефективності технологічного обладнання, зокрема, обладнання для механічної обробки матеріалів, за рахунок розробки та застосування систем автоматичного керування вимагає не-

складних достовірних математичних моделей робочих процесів, що протікають в приводах та достатньо повно враховують особливості технологічного призначення обладнання.

Мета статті. Метою даної роботи є розробка математичних моделей динамічних характеристик автоматичного електрогідравлічного привода з об'ємним регулюванням технологічного обладнання, а також структурних схем математичних моделей обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкта автоматичного керування.

Матеріали та результати дослідження. Схеми та принцип роботи автоматичних ЕГП технологічного обладнання з об'ємним регулюванням, зокрема, обладнання для механічної обробки матеріалів з гідроприводом обертального руху, зазвичай включають дві аксіально-поршневі гідромашини: основний насос та гідродвигун [4, 6, 7]. Вал насоса приводиться в обертання від асинхронного електродвигуна, а подача насоса регулюється зміною кута нахилу блоку циліндрів (або кута нахилу шайби).

При розробці схемних рішень автоматичних ЕГП технологічного обладнання для використання переваг об'ємного способу регулювання важливим є правильний вибір системи управління подачі насоса. Аналіз систем різного призначення показує [5, 6], що застосування електрогідравлічних підсилювачів (ЕГПС) дозволяє в повному обсязі реалізувати функціональні вимоги до обладнання.

Аналогові ЕГПС як самостійні пристрої з'явилися у зв'язку із необхідністю створення високоякісних систем керування та знайшли застосування в галузях промисловості, де нові технології вимагали якісно іншого підходу до керування процесами. ЕГПС є сполучною ланкою між малопотужними електричними керуючими пристроями та силовими гідравлічними механізмами. Крім того, ЕГПС дають можливість застосовувати мікропроцесорну техніку для керування технологічним обладнанням.

Гідропідсилювачі в порівнянні з іншими типами підсилювачів, наприклад електромеханічними, мають ряд переваг: кращими динамічними властивостями, більшою надійністю, простотою конструкції та дуже високими коефіцієнтами підсилення по потужності (понад $3 \cdot 10^6$). Достатньо відзначити, що відношення маси до потужності гідропідсилювача досягає $0,04 \text{ кг/кВт}$, в той час, як в електромеханічних підсилювачах цей показник приблизно 20 кг/кВт , а магнітних - до 70 кг/кВт .

ЕГПС можна використовувати практично з будь-яким типом об'ємної гідравлічної машини. У машинобудуванні досить широко поширені аксіально-поршневі машини, які мають гарні вагові характеристики (при рівній потужності вони в 2-3 рази легше машин інших типів), швидкодію та ін. [6, 10].

Схема регулювання кута нахилу шайби аксіально-поршневого насоса ЕГПС представлена на рис. 1. Тут використаний однокаскадний ЕГПС, у якого шток пропорційного електромагніту пов'язаний безпосередньо із золотником керуючого дроселюючого

гідророзподільника. Чотирьохщільний дроселюючий гідророзподільник подає рідину до плунжерів, які переміщують похилу шайбу аксіально-поршневого насоса.

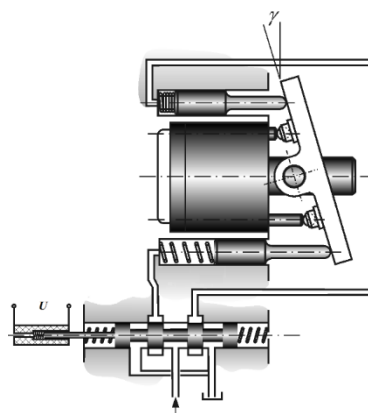


Рис. 1. Управління кутом нахилу шайби аксіально-поршневого насоса

Регульовані аксіально-поршневі насоси з похилою шайбою, частіше за все, в номенклатурі серійно випускається гідроапаратури, що випускається серійно, представлені як гідроагрегати із вбудованим ЕГПС [4, 6, 7]. З використанням паспортних даних допустимо побудувати динамічну модель другого порядку процесу регулювання кута нахилу шайби насоса γ по керуючій напрузі U

$$T_{2a}^2 \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + T_{1a} \frac{d\gamma}{dt} + \gamma = k_{\gamma U} U, \quad (1)$$

де $k_{\gamma U}$ - коефіцієнт передачі, який можна визначити по номінальному керуючому напрузі U_{nom} та номінальному куту нахилу шайби аксіально-поршневого насоса γ_{nom}

$$k_{\gamma U} = \frac{\gamma_{nom}}{U_{nom}}, \quad (2)$$

Постійні часу T_{2a} , T_{1a} відомим чином визначаються за частотами зсуву по фазі відповідно на -45° і -90° [2, 4]:

$$T_{2a} = \frac{1}{2\pi\nu_2}; \quad T_{1a} = \frac{1}{2\pi\nu_1} - \frac{2\pi\nu_1}{(2\pi\nu_2)^2}, \quad (3)$$

Даний підхід до побудови динамічної моделі автоматичного керування кутом нахилу шайби аксіально-поршневого насоса цілком можна застосувати і в разі використання ЕГПС як самостійного пристрою, які в номенклатурі гідроапаратури, що випускається серійно, представлені як дроселюючі гідророзподільники або розподільники з пропорційним управлінням [4, 6].

Слід зазначити, що регулювання подачі насоса може здійснюватися не тільки зміною кута нахилу

шайби, а й іншими способами, наприклад, зміною кута нахилу блоку циліндрів. Незавжди переконавшись, що і в даному випадку динамічна модель процесу регулювання кута нахилу люльки блоку циліндрів матиме подібний вид.

Таким чином, передавальна функція процесу регулювання кута нахилу шайби (блоку циліндрів) відповідно до (1) має вигляд

$$W_{rp}(s) = \frac{k_{\gamma}U}{T_{2a}^2s^2 + T_{1a}s + 1}, \quad (4)$$

де s - змінна Лапласа.

Як показали подальші експериментальні дослідження, а також аналіз характеристик ЕГПС, що використовуються в регульованих насосах, передавальну функцію процесу регулювання робочого об'єму насоса можна розглядати як аперіодичну ланка першого порядку

$$W_{rp}(s) = \frac{k_{\gamma}U}{T_{rp}s + 1}, \quad (5)$$

де T_{rp} - постійна часу процесу регулювання

$$T_{rp} = \frac{1}{2\pi\nu_1}. \quad (6)$$

У роботах авторів [7, 8] отримана передавальна функція силової частини ЕГП з об'ємним регулюванням для кута повороту валу гідромотора α по куту нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ

$$W_{\alpha\gamma}(s) = \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{hd}s(T_m^2s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (7)$$

де T_{hd} - постійна часу гідроприводу;

T_m - постійна часу гідромотора;

ζ_m - коефіцієнт відносного демпфірування гідромотора.

Для побудови математичної моделі ЕГП з об'ємним регулюванням як об'єкта автоматичного керування передавальну функцію для кута повороту валу по куту нахилу шайби (блоку циліндрів) приводу (7) перепишемо у вигляді

$$\begin{aligned} W_{\alpha\gamma}(s) &= \frac{\alpha(s)}{\gamma(s)} = \frac{\alpha(s)}{\Omega(s)} \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \\ &= \frac{1}{s} W_{pd}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{s(T_m^2s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $W_{pd}(s)$ - введена в розгляд передавальна функція силової частини приводу (передавальна функція для кутової швидкості обертання валу гідромотора по куту нахилу шайби або блоку циліндрів)

$$W_{pd}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_m^2s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1}, \quad (9)$$

де $k_{\Omega\gamma}$ - коефіцієнт передачі силової приводу, який відповідно до [7, 8] можна визначити за виразом

$$k_{\Omega\gamma} = \frac{2\pi k_{Q\gamma}}{q_m}, \quad (10)$$

q_m - робочий об'єм гідромотора; $k_{Q\gamma}$ - коефіцієнт передачі для витрати насоса по куту нахилу шайби (блоку циліндрів), який для аксіально-поршневого насоса становить

$$k_{Q\gamma} = \frac{F_n z_n D_n \Omega_n}{2\pi}, \quad (11)$$

F_n - робоча площа одного поршня (плунжера) насоса; z_n - число поршнів; D_n - діаметр окружності, на якій розташовані осі поршнів насоса; Ω_n - кутова швидкість валу насоса.

Необхідно відзначити наступне. Кутова швидкість обертання валу гідромотора, в загальному випадку, визначається не тільки робочим об'ємом насоса, але і величиною навантажувального моменту M на валу двигуна. Ступінь впливу встановлюється для конкретного приводу, причому, збільшення навантажувального моменту однозначно призводить до зменшення кутової швидкості обертання, що в лінійному наближенні може бути відображено передавальною функцією

$$W_{\Omega M}(s) = \frac{\Omega(s)}{M(s)} = -k_{\Omega M}, \quad (12)$$

де $k_{\Omega M}$ - коефіцієнт передачі для кутової швидкості обертання по навантажувальному моменту, величина якого можна оцінити по статичним характеристикам об'ємного гідравлічного приводу [6, 8].

Таким чином, враховуючи принцип суперпозиції

$$\Omega(s) = W_{cn}(s)\gamma(s) + W_{\Omega M}(s)M(s), \quad (13)$$

математичну модель технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкта автоматичного керування можна представити структурною схемою, наведеною на рис. 2.

Розрахунок динамічних характеристик ЕГП з об'ємним регулюванням з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення в середовищі пакету прикладних програм MATLAB показав, що в більшості випадків для реальних приводів технологічного обладнання передавальну функцію

силової частини приводу (9) допустимо спрощено розглядати як аперіодичну ланку першого порядку

$$W_{pd}(s) = \frac{k_{\Omega\gamma}}{T_{pd}s + 1}, \quad (14)$$

де T_{pd} - постійна часу силової частини приводу, значення якої можна визначити згідно з теоретичними залежностями, а також на основі експериментальної оцінки динамічних характеристик приводу [1, 4].

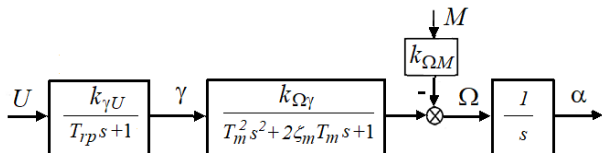


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі ЕГП як об'єкта автоматичного управління

В цьому випадку спрощену математичну модель обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкта автоматичного керування можна представити структурною схемою, наведеною на рис. 3.

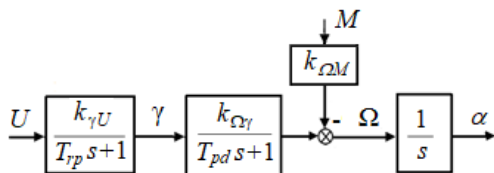


Рис. 3. Структурна схема спрощеної математичної моделі

Для перевірки адекватності отриманих математичних моделей розроблено автоматизований стенд експериментальних досліджень та методика обробки дослідних даних [4] (на стенді використаний насос типу НАС 0,04/20 з максимальним робочим об'ємом 0,04 л та гідромотор типу ПМ № 2,5А з робочим об'ємом 0,0317 л).

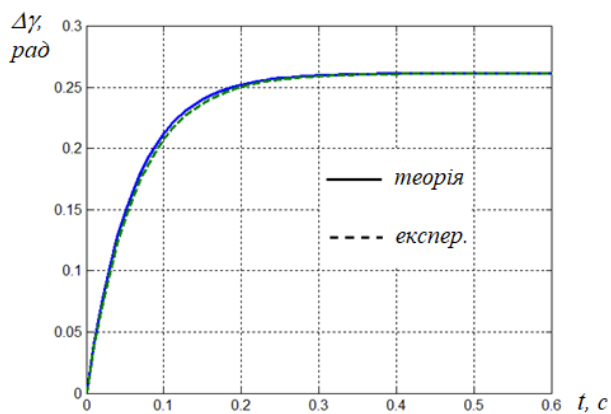


Рис. 4. Перехідний процес для блоку регулювання насоса (зміна кута нахилу шайби $\Delta\gamma$, рад, подачі керуючої напруги)

На рис. 4, 5 зіставлені дослідні та розрахункові перехідні процеси для блоку регулювання насоса при подачі керуючої напруги та приводу в цілому при зміні керуючого сигналу. Слід зазначити, що розрахункові значення перехідного процесу для приводу в цілому (рис. 5) збіглися з точністю графічної побудови для повної і спрощеної математичних моделей. Експериментальні значення критерію Фішера (менше 1,2) не перевищували табличних значень $\approx 1,8$ при довірчій ймовірності $\alpha = 0,95$. Тому розроблені моделі динамічних характеристик можна вважати адекватними та покласти в основу подальших досліджень по синтезу систем автоматичного керування технологічним обладнанням.

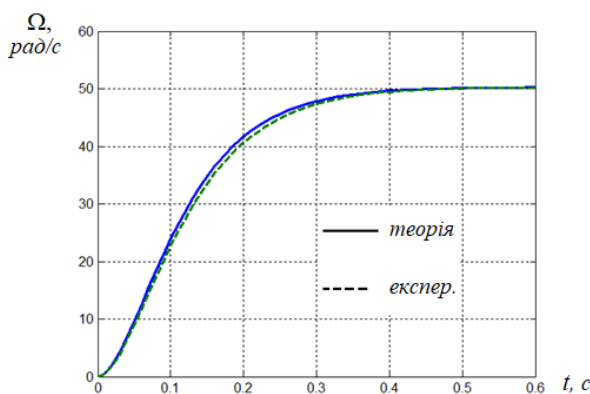


Рис. 5. Перехідний процес для приводу в цілому

Висновки. Таким чином, розроблені математичні моделі динамічних характеристик автоматичного електрогідрравлічного приводу з об'ємним регулюванням технологічного обладнання, представлені структурні схеми математичних моделей обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єкта автоматичного керування. Адекватність математичних моделей процесу регулювання робочого об'єму насоса, а також приводу в цілому підтверджена експериментально.

Математичні моделі технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху як об'єктів автоматичного керування покладені в основу подальших досліджень по синтезу систем автоматичного керування обладнанням.

Література

1. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
2. Соколов В.І. Розробка та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху / В.І. Соколов, О.Г. Степанова, Я.І. Степчук, Д.Ю. Кавун, М.К. Ткаченко // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2017. - № 7 (237). - С. 63-70.
3. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и

- пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
4. Рассказова Ю.Б., Степанова О.Г., Азаренко Н.Г. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2016. – 100 с.
 5. Sokolova Y., Azarenko N., Sokolov V. The synthesis of system of automatic control of equipment for machining materials with hydraulic drive // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – Vol. 2. – Issue 2 (68). – 2014. – P. 56–60.
 6. Коваленко А. А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. – Луганск: ДонГАСА, 1999. – 137 с.
 7. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.* – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin–Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
 8. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture.* – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 – 273.
 9. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // *EUREKA: Physics and Engineering.* – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
 10. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі АРМ WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
 11. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
 12. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // *Procedia Engineering.* – Vol. 206. – P. 936–943.
 13. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кріль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецк: ВНУ им. В. Даля, 2017. – 320 с.
 14. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
 15. Кріль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
 16. Соколов В.І., Кріль О.С., Єпіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.
 17. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.
 18. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
 19. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* IEEE. – 2018.
 20. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
 21. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems.* – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
 22. Krol O. Sokolov V. 3D Modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 140 p.
 23. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // *Journal of Physics: Conference Series.* – Vol. 1084. – 2018.
 24. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // *EUREKA: Physics and Engineering.* – N 4. – 2018. – P. 15-20.
 25. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.

References

1. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* IEEE. – 2018.
2. Sokolov V.I. Rozrobka ta doslidzhennia systemy avtomatichnoho keruvannia tekhnolohichnym obladnanniam z hidropryvodom obertalnoho rukhu / V.I. Sokolov, O.H. Stepanova, Ya.I. Stepchuk, D.Iu. Kavun, M.K. Tkachenko // *Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia.* - 2017. - № 7 (237). - S. 63-70.
3. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – М.: Mashinostroenie, 1987. –464 с.
4. Rasskazova Y., Stepanova O., Azarenko N. Perfection of Electrohydraulic Drives of Machine-Building Equipment. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 100 s.
5. Sokolova Y., Azarenko N., Sokolov V. The synthesis of system of automatic control of equipment for machining materials with hydraulic drive // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – Vol. 2. – Issue 2 (68). – 2014. – P. 56–60.
6. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovy ob'emnogo gidravlicheskogo privoda stroitelnykh i dorozhnykh mashin. - Lugansk: DonGASA. – 1999. – 137 s.
7. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.* – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin–Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
8. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // *TEKA Commission of Motorization*

- and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 - 273.
9. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
 10. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
 11. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
 12. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
 13. Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallovezhushchih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dal'ya, 2017. – 320 s.
 14. Navrotsky K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
 15. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 160 p.
 16. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.
 17. Kovalenko A.A. Osnovy tehnichekoj mehaniki zhidkostej i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.
 18. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
 19. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
 20. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
 21. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
 22. Krol O. Sokolov V. 3D Modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 140 p.
 23. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
 24. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
 25. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.

Соколов В.И., Степанова О.Г., Батурич Е.А. Исследование динамических характеристик электрогидравлического привода технологического оборудования

Предложено математические модели динамических характеристик автоматического электрогидравлического привода с объемным регулированием технологического оборудования. Представленные структурные схемы математических моделей оборудования с гидроприводом вращательного движения как объекта автоматического управления. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамических характеристик электрогидравлического привода. Выполню проверку адекватности разработанных математических моделей.

Ключевые слова: насос, гидромотор, объемное регулирование, передающая функции, структурная схема, переходной процесс.

Sokolov V., Stepanova O, Baturin Y. Reseach of dynamic characteristics for electrohydraulic drive of technological equipment.

The mathematical models of the dynamic characteristics for automatic electrohydraulic drive with volume regulation of technological equipment are proposed. The structural schemes of mathematical models of equipment with hydraulic rotary motion drive as object of automatic control are presented. The results of theoretical and experimental reseach of the dynamic characteristics of electrohydraulic drive are given. The validation of the adequacy for the developed mathematical models are performed.

Keywords: pump, hydraulic motor, volumetric regulation, transfer function, block diagram, transient process.

Соколов Володимир Ілліч – д.т.н., проф., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) sokolov.snu.edu@gmail.com
Степанова Оксана Геннадіївна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) ogstepanova@gmail.com
Батурич Євген Олександрович – студент групи ММ-151, факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) baturin2307@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 08.02.2019.

УДК 621.002.5: 62-83.001.6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Степанова О.Г.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HYDRAULIC DRIVE FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Stepanova O.

Представлений стенд для проведення експериментальних досліджень ефективності способів регулювання швидкості обертального руху вихідної ланки об'ємного гідравлічного приводу технологічного обладнання. Розглянута методика експериментальних досліджень та обробки дослідних даних. На основі аналізу експериментальних залежностей коефіцієнта корисної від глибини регулювання показано перевагу регулювання швидкості вихідної ланки зміною робочого об'єму насоса у порівнянні з дросельним способом регулювання.

Ключові слова: технологічне обладнання, гідравлічний привід, насос, гідромотор, об'ємний спосіб регулювання, дросельний спосіб регулювання.

Постановка проблеми. Сучасні ресурсозберігаючі технології машинобудування пред'являють дедалі більші вимоги до технічних та функціональних характеристик технологічного обладнання. Якість виробів при механічній обробці багато в чому залежить від можливостей реалізації оптимальних законів руху робочих органів та заданих швидкостей в умовах змінного навантаження. У цьому зв'язку важливим є підвищення точності та розширення функціональних можливостей приводів технологічного обладнання [1-5].

Досягнення довірливої кінематики робочих органів, можливість програмної реалізації оптимальних законів руху забезпечується застосуванням автоматичних електрогідравлічних приводів [6-9]. У той же час, рівень енергоефективності сучасного технологічного обладнання не завжди відповідає вимогам ресурсозберігаючих технологій. Коефіцієнт корисної дії (ККД) автоматичних електрогідравлічних приводів енергоємного обладнання (до 200 кВт), яке випускається або використовується вітчизняною промисловістю, залишається низьким, в ряді випадків не перевищує 20-30%. Існує певний резерв підвищення ефективності приводів, а саме, їх економічності, функціональних можливостей, точності, зокрема, зменшення потужності, що споживається, за

рахунок скорочення витрат енергії, пов'язаних з процесом регулювання.

Тому, актуальними є дослідження характеристик робочих процесів при регулюванні вихідних параметрів автоматичних електрогідравлічних приводів технологічного обладнання, впливу способів та методів регулювання на ефективність приводів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналіз основних способів регулювання швидкості вихідних ланок об'ємних гідравлічних приводів досить широко представлений в літературі [6, 10-13]. Аналітичні методи оцінки показників та характеристик процесів регулювання не набули широкого поширення в силу їх складності [1, 14-19]. З огляду на необхідність прийняття істотних спрощень і припущень результати розрахунків є наближеними та мають значну похибку. Крім того, отримані аналітично математичні залежності потребують перевірки адекватності, яка може бути виконана тільки на основі експериментальних досліджень.

Так як експериментальні методи відносно прості та дозволяють порівняно швидко отримати характеристики об'єкту, що досліджується, вони отримали широке розповсюдження при оцінці показників ефективності автоматичних електрогідравлічних приводів [6, 20, 21].

Мета статті. Метою роботи є проведення експериментальних досліджень показників та характеристик процесів регулювання швидкості обертального руху вихідної ланки об'ємного гідропроводу технологічного обладнання, оцінка ефективності способів регулювання швидкості вихідної ланки.

Матеріали та результати дослідження. Дослідження показників та характеристик процесів регулювання швидкості обертального руху вихідної ланки об'ємного гідропроводу проводилися на експериментальному стенді, гідравлічна схема якого показана на рис. 1.

Крім того, на стенді передбачалася можливість вимірювання манометрами $MH1$, $MH2$, $MH3$ тисків на вході насоса H , вході та виході гідромотора M , а також ртутним термометром температури робочої рідини на вході в насос.

Склад контрольно-вимірювальної та реєструючої апаратури визначався тими параметрами, які необхідно було вимірювати для розрахунку статичних та динамічних характеристик окремих елементів і гідравлічного приводу в цілому [22-25].

Під час статичного випробування вимірювалися:

ω_n , ω - частота обертання валів насоса та мотора;

M_n , M_m - крутний момент на валу насоса і мотора;

p_n , p_c - тиску в лініях нагнітання та зливу.

Частота обертання валів вимірювалася лічильниками імпульсів типу $СБ-1М/100$ від електричної мережі та датчика, встановленого на валу машин. Похибка визначення частоти обертання при цьому не перевищувала 2%.

Як уже зазначалося, крутний момент на валу гідромотора та насоса визначався за допомогою динамометрів

$$M = F_{\phi} l \quad (1)$$

де F_{ϕ} - показання динамометра; l - плече важеля.

На стенді використані динамометри марки $ДПУ-0,02-2$, що забезпечило похибку вимірювання моменту не більше 2%.

Тиски в системі вимірювалися манометрами $N_n = M_n \omega_n$ трубопроводу через демпфери.

Визначення ефективності об'ємного способу регулювання швидкості вихідної ланки гідравлічного приводу здійснювалося наступним чином. На експериментальному стенді (рис. 1) закривалися дроселі $ДР2$ та $ДР3$ і повністю відкривався дросель регулятора потоку $РП$. Продуктивність насоса регулювалася електричним сигналом, що подається на $ЕГП$.

Споживану потужність гідравлічного приводу знаходили по виміряним значенням моменту на валу насоса і частоти обертання насоса

$$N_n = M_n \omega_n \quad (2)$$

Корисну потужність розраховували за значеннями моменту на валу гідромотора та частоти обертання валу гідромотора

$$N_m = M_m \omega_m \quad (3)$$

ККД гідравлічної частини приводу визначали, як

$$\eta = \frac{N_m}{N_n} \quad (4)$$

В процесі експериментів контролювався рівень тисків в нагнітальній та зливній магістралях манометрами $MH1$ та $MH2$. Процедура повторювалася при різних навантаженнях, які встановлювалися дроселем $ДР3$ гідрогальма. Кожен дослід повторювався кілька разів, причому послідовність їх була рандомізована, щоб уникнути впливу неврахованих факторів.

Дослідження ефективності дросельних способів регулювання (з дроселем на вході та паралельно гідромотору M) виконувалося наступним чином. У першому випадку дроселі $ДР3$ та $ДР2$ були закриті і зміна частоти обертання гідромотора M здійснювалася дроселем регулятора потоку $РП$. У другому випадку дросель регулятора потоку був повністю відкритий, а регулювання здійснювалося дроселем $ДР2$ при повністю закритому $ДР1$. Досліди виконувались при постійній (максимальній) продуктивності насоса. Вимірювалися ті ж параметри та визначалися залежності (4) від безрозмірної частоти обертання валу гідромотора M (тобто від глибини регулювання)

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_{max} \quad (5)$$

де ω_{max} - максимальна частота обертання

Методика обробки дослідних даних при проведенні експериментальних досліджень досить повно викладена в літературі [12, 20, 25].

На рис. 2 показані залежності ККД від безрозмірної частоти обертання при об'ємному (1) та дросельному (2) способах регулювання. При дросельному регулюванні розглядався випадок установки дроселя на вході гідромотора. Аналіз наведених залежностей показує перевагу регулювання швидкості зміною робочого об'єму насоса.

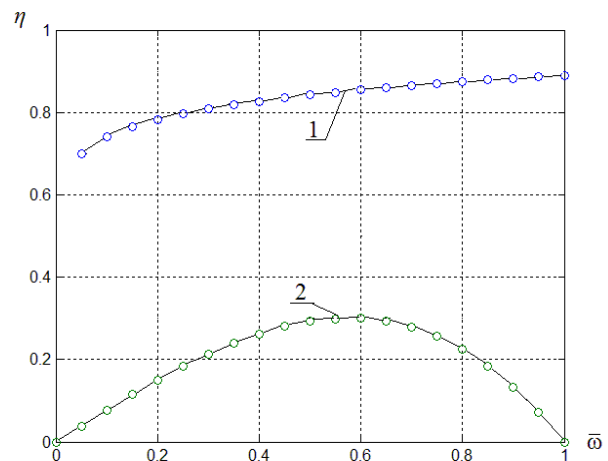


Рис. 2. Залежність ККД гідроприводу від глибини регулювання

Висновки. Представлений стенд для проведення експериментальних досліджень ефективності способів регулювання швидкості обертального руху вихідної ланки об'ємного гідроприводу, розглянута методика експериментальних досліджень та обробки

дослідних даних. Порівнянням експериментальних залежностей ККД від глибини регулювання показано перевагу регулювання швидкості вихідної ланки зміною робочого об'єму насоса.

Л і т е р а т у р а

1. Кріль О.С., Шевченко С.В., Соколов В.І. Проектування металорізальних верстатів у середовищі APM WinMachine. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2011. – 388 с.
2. Кріль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – 160 с.
3. Krol O., Sokolov V. 3D Modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 140 p.
4. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
6. Коваленко А.А., Соколов В.И., Уваров П.Е., Пазин В.В. Основы объемного гидравлического привода строительных и дорожных машин. – Луганск: ДонГАСА, 1999. – 137 с.
7. Соколов В.І. Розробка та дослідження системи автоматичного керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху / В.І. Соколов, О.Г. Степанова, Я.І. Степчук, Д.Ю. Кавун, М.К. Ткаченко // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту ім. В. Даля. - 2017. - № 7 (237). - С. 63-70.
8. Sokolova Y., Azarenko N., Sokolov V. The synthesis of system of automatic control of equipment for machining materials with hydraulic drive // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 2. – Issue 2 (68). – 2014. – P. 56–60.
9. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
10. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin-Rzeszow, Poland. – P. 27-32.
11. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. – pp. 268 - 273.
12. Харламов Ю.А., Соколов В.И., Кріль О.С. Трибологическая надежность металлорежущих станков. – Северодонецьк: ВНУ ім. В. Даля, 2017. – 320 с.
13. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
14. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
15. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
16. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
17. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
18. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
19. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
20. Рассказова Ю.Б., Степанова О.Г., Азаренко Н.Г. Совершенствование электрогидравлических приводов машиностроительного оборудования. – Северодонецьк: ВНУ ім. В. Даля, 2016. – 100 с.
21. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
22. Коваленко А.А., Соколов В.И., Дымнич А.Х., Уваров П.Е. Основы технической механики жидкостей и газов: Учебное пособие для вузов. – Луганск: ВГУ, 1998. – 272 с.
23. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
24. Кріль О.С., Шумакова Т.О., Соколов В.І. Проектування зуборізних інструментів за допомогою системи КОМПАС. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2013. – 142 с.
25. Соколов В.І., Кріль О.С., Єфіфанова О.В. Гідравліка. – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2017. – 160 с.

References

1. Krol O., Shevchenko S.V., Sokolov V. Design machine tools in environment APM WinMachine. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2011.
2. Krol O.S. Three-dimensional modeling of machine tools and tool equipment. Handbook. / O.S. Krol, V.I. Sokolov. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 160 p.
3. Krol O., Sokolov V. 3D Modeling of machine tools for designers: monograph. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 140 p.
4. Popov D.N. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem. – М.: Mashinostroenie, 1987. –464 s.
5. Navrotskiy K.L. Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov. – М.: Mashinostroenie, 1991. – 384 s.
6. Kovalenko A. A., Sokolov V.I., Uvarov P.E., Pazin V.V. Osnovy ob'emnogo gidravlicheskogo privoda stroitelnyh i dorozhnyih mashin. - Lugansk: DonGASA. – 1999. – 137 s.
7. Sokolov V.I. Rozrobka ta doslidzhennia systemy avtomatichnoho keruvannia tekhnolohichnym obladnanniam z hidropryvodom obertalnoho rukhu / V.I. Sokolov, O.H. Stepanova, Ya.I. Stepchuk, D.Iu. Kavun, M.K. Tkachenko // Visn. Skhidnoukr. natsion. un-tu im. V. Dalia. - 2017. - № 7 (237). - S. 63-70.
8. Sokolova Y., Azarenko N., Sokolov V. The synthesis of system of automatic control of equipment for machining

- materials with hydraulic drive // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 2. – Issue 2 (68). – 2014. – P. 56–60.
9. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
 10. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – Vol. 17. – N 1. – 2017. – Lublin–Rzeszow, Poland. - P. 27-32.
 11. Sokolov V., Azarenko N., Sokolova Ya. Simulation of the power unit of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation // TEKA Commission of Motorization and Energetic in Agriculture. – Vol. 12. – N 4. – 2012. – Lublin, Poland. - pp. 268 - 273.
 12. Kharlamov Y., Sokolov V., Krol O. Tribologicheskaya nadezhnost metallorezhuschih stankov. – Severodonetsk: VNU im. V. Dalya, 2017. – 320 s.
 13. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2019. – Springer, Cham. – P. 364-373.
 14. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two-support spindles for machining centers with lubrication system // EUREKA: Physics and Engineering. – N. 3. – 2018. – P. 52–58.
 15. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools using prediction procedures // EUREKA: Physics and Engineering. – N 4. – 2018. – P. 15-20.
 16. Krol O., Sokolov V. Modeling Carrier System Dynamics for Metal-Cutting Machines // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. – 2018.
 17. Krol O., Sokolov V. Development of models and research into tooling for machining centers // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 3. – Issue 1 (93). – 2018. – P. 12–22.
 18. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – Vol. 63. – 2019. – Springer, Cham. – P. 278-283.
 19. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers: monograph. – Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. – 112 p.
 20. Rasskazova Y., Stepanova O., Azarenko N. Perfection of Electrohydraulic Drives of Machine-Building Equipment. – Severodonetsk: VDEUNU, 2016. – 100 s.
 21. Krol O., Sokolov V. Modelling of spindle nodes for machining centers // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 1084. – 2018.
 22. Kovalenko A.A. Osnovy tehnikeskoj mehaniki zhidkosteij i gazov: uchebnoe posobie dlja vuzov / A.A. Kovalenko,

V.I. Sokolov, A.H. Dymnich, P.E. Uvarov. - Lugansk: VUGU, 1998. - 272 s.

23. Sokolov V., Krol O. Installations criterion of deceleration device in volumetric hydraulic drive // Procedia Engineering. – Vol. 206. – P. 936–943.
24. Krol O., Shumakova T., Sokolov V. Design metal cutting instruments by dint of system of KOMPAS. V. Dahl EUNU, Lugansk, 2013.
25. Sokolov V., Krol O., Yepifanova O. Hydraulics. V. Dahl EUNU, Severodonetsk, 2017.

Степанова О.Г. Экспериментальные исследования гидравлического привода технологического оборудования.

Представлен стенд для проведения экспериментальных исследований эффективности способов регулирования скорости вращательного движения выходного звена объемного гидравлического привода технологического оборудования. Рассмотрена методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных. На основе анализа экспериментальных зависимостей коэффициента полезного от глубины регулирования показано преимущество регулирования скорости выходного звена изменением рабочего объема насоса по сравнению с дроссельным способом регулирования.

Ключевые слова: технологическое оборудование, гидравлический привод, насос, гидромотор, объемный способ регулировки, дроссельный способ регулировки.

Stepanova O. Experimental researches of hydraulic drive for technological equipment.

The stand for conducting of experimental researches for efficiency of regulation methods for speed of rotational movement of volume hydraulic drive output unit for technological equipment is presented. The method for experimental researches and processing of experimental data is considered. On the basis of the analysis for experimental dependencies of the efficiency coefficient from the regulation depth shows the advantage of adjusting the output unit by changing the working volume of the pump in comparison with the throttle regulation method.

Key words: technological equipment, hydraulic drive, pump, hydromotor, volume regulation method, throttle regulation method.

Степанова Оксана Геннадіївна – аспірант кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) ogstepanova@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Хараламов Ю.О.**

Стаття подана 11.02.2019.

УДК 621.22.62-82

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ

Таванюк Т.Я., Ніколаєнко А.П., Романченко О.В.,
Шумакова Т.О., Логунов О.М.

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL BY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Tavanyuk T., Nikolaienko A., Romanchenko A.,
Shumakova T., Logunov O.

Наведена система автоматичного керування технологічного обладнання, що враховує стохастичні збурення й шуми спостереження. Обґрунтовано використання комбінованої системи керування обладнанням. Виконано синтез спостерігача Калмана-Бьюсі та оптимального лінійного регулятора.

Ключові слова: динамічні характеристики; коригуюча ланка; спостерігач Калмана; стохастичне збурення.

Вступ. Сучасне технологічне обладнання вимагає високої точності забезпечення оптимальних законів руху робочих органів, що досягається застосуванням систем автоматичного керування [1].

Найбільшого поширення набули методи корегування, засновані на застосуванні електричних пристроїв, які досить просто здійснити. В автоматичних приводах переважно застосовують негативні зворотні зв'язки, з великого числа коригувальних ланцюгів. Однак електричні пристрої не завжди забезпечують необхідну надійність роботи і можуть спричинити виникнення перешкод, які деформують сигнали управління, що утворюються в контурі приводу [3].

Метою даної статті є розробка системи автоматичного керування технологічним обладнанням.

Методика дослідження. Задача синтезу системи автоматичного керування полягає у виборі структури та параметрів системи регулювання об'єкта, які відповідно до заданих технічних умов забезпечують найбільш оптимальні параметри по запасам стійкості і показниками якості. Таким чином, завдання синтезу включає в себе визначення структури і параметрів коригувальних ланок при відомих параметрах інших ланок, що входять в систему, з урахуванням заданих технічних умов.

Для підвищення точності обробки пропонується використовувати комбіновану систему автомати-

чного управління процесом переміщення, в якій зміна напруги на вході процесу коригується пропорційно різниці фактичного і заданого переміщення. Коригування здійснюється за прямим показником якості регулювання- зміни переміщення. Це призводить до зниження коливальності в системі і отже збільшується запас стійкості приводу при збереженні допустимої швидкісної помилки стеження [6].

Основним збурюючим впливом на систему керування є навантаження, основним керуючим впливом - зміна напруги. Основний параметр, який характеризує робочий процес обладнання - переміщення робочого органу [5].

З урахуванням передавальної функції об'єкта диференціальне рівняння його управління набуде вигляду [4]:

$$\begin{aligned} y \cdot s \cdot (T_{oy}s + 1) \cdot (T_{ЭГУ}s + 1) &= K_{ЭБ} \cdot K_{Qi} \cdot K_{VQ} \cdot U, \\ y \cdot (a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3) &= b_0 \cdot U, \\ a_0y^{(3)} + a_1y^{(2)} + a_2y^{(1)} + a_3y &= b \cdot U, \end{aligned} \quad (1)$$

де $K_{ЭБ}$, K_{Qi} , K_{VQ} – коефіцієнти передач; T_{oy} , $T_{ЭГУ}$ – постійні часу; $y^{(n)}$ – n-а похідна за часом вихідної координати стану об'єкта керування, $n=1,2,3$; U – керуючий вплив, $U=u$; a_i, b_k – постійні, $i = 0,1,2,3, k = 0$.

В матричній формі рівняння подані

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + V_0(t), \\ y &= Cx + V_n(t), \end{aligned} \quad (2)$$

де x - фазовий вектор змінних стану об'єкта автоматичного управління; u - керуючий вплив; y - вихідна змінна; A - матриця параметрів об'єкта управління;

B - матриця вхідних параметрів; C - матриця вихідних параметрів; $V_0(t), V_n(t)$ - білі шуми.

Так як основне призначення системи автоматичного керування технологічним обладнанням - підвищення точності регулювання переміщення робочого органу при збурюючих впливах, то задача синтезу системи - досягнення мінімуму результуючої помилки [4].

Будь-яке, навіть короточасне, підвищення значення напруги, що управляє може привести до появи коливання в системі, що не прийнятне з точки зору технологічних вимог, що пред'являються до обладнання. Тому, для забезпечення необхідних технологічних вимог, що висувуються до обладнання, необхідно мінімізувати дисперсію сигналу і ввести обмеження керуючого впливу в критерій оптимальності управління.

Тому критерій оптимальності управління має вигляд

$$J = \int_0^{t_f} \tilde{Q}x^2(t) + Ru^2(t)dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $x(t)$ - фазовий вектор змінних стану об'єкта автоматичного управління (помилка управління); $u(t)$ - керуючий вплив; Q - позитивно-визначена матриця, що характеризує якість управління; R - величина обмеження керуючого впливу.

У зв'язку з тим, що стохастичний збурюючий вплив, який прикладено до об'єкта управління, проявляє себе незалежно від керуючого сигналу, то синтез системи автоматичного керування технологічним обладнанням виконаний з урахуванням адитивної перешкоди.

Таким чином, рішення задачі синтезу стохастичною лінійною оптимальною системою при неповній інформації про стан згідно з методом поділу розбивається на дві:

- 1) задачу синтезу лінійного оптимального спостерігача;
- 2) детерміновану задачу синтезу оптимальної системи [1].

Перша задача вирішується синтезом спостерігача Калмана-Бьюсі, структурна схема якого подана на рис. 1.

Моделювання системи автоматичного керування технологічним обладнанням проведено з використанням програми Matlab [6]. На рис. 2 показано вплив вектору коефіцієнтів підсилення спостерігача Калмана-Бьюсі K' на перехідний процес.

Для синтезу оптимального лінійного регулятора використовується метод динамічного програмування.

Результати моделювання показують, що використання спостерігача Калмана-Бьюсі дозволяє пригнічувати прикладені збудження, що призводить до поліпшення якості перехідних процесів.

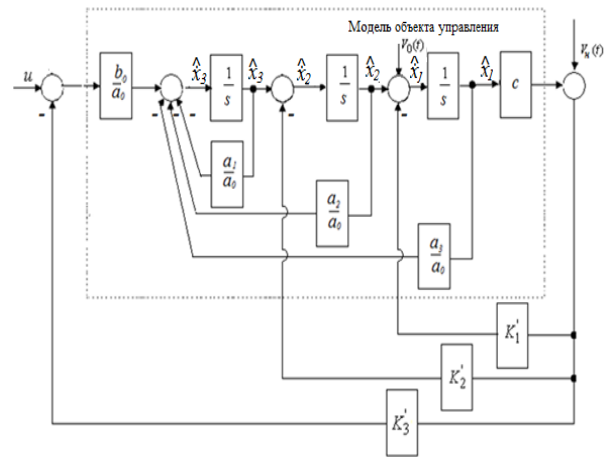


Рис. 1. Структурна схема спостерігача Калмана-Бьюсі; K'_1, K'_2, K'_3 - коефіцієнти підсилення спостерігача Калмана-Бьюсі

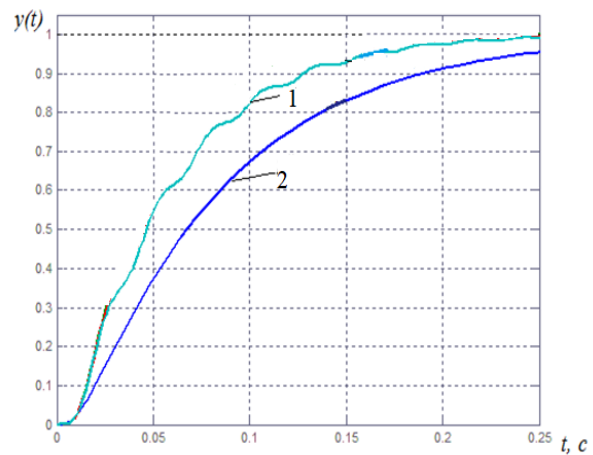


Рис. 2. Перехідний процес: 1- без використання фільтра Калмана-Бьюсі; 2 – з використанням фільтра Калмана-Бьюсі

Висновки. Використання комбінованої системи автоматичного керування, де зміна напруги на вході процесу корегується пропорційно різниці фактичного й заданого переміщення, дає можливість реалізувати оптимальні закони руху вихідної ланки.

Література

1. Теория автоматического управления. ч. 2: 2-е изд. перераб. и доп./ А.А. Воронов, Д.П. Ким, И.М. Лохин – М.: Высш.шк., 1986. – 504 с.
2. Гамынин Н.С. Гидравлический привод систем управления – М.: Машиностроение, 1972. –376 с.
3. Синтез систем автоматического управления / В.В. Григорьев, Н.В. Журавлева, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 108 с.
4. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М.: Бином, 2004. – 912 с.
5. Ермаков О.А. Выбор и расчет корректирующих цепей для гидравлической следящей системы -М.:Мади, 1985. – 350с.
6. Лазарев Ю.А. Моделирование процессов и систем в MATLAB – СПб.: Изд. BHV, 2005. –512 с.

References

1. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. ch. 2: 2-e izd. pererab. i dop./ A.A. Voronov, D.P. Kim, I.M. Lohin – M.: Vyssh.shk., 1986. – 504 s.
2. Gamynin N.S. Gidravlicheskiy privod sistem upravlenija – M.: Mashinostroenie, 1972. – 376 s.
3. Sintez sistem avtomaticheskogo upravlenija / V.V. Grigor'ev, N.V. Zhuravleva, G.V. Luk'janova, K.A. Sergeev. – SPb: SPbGU ITMO, 2007. – 108 s.
4. Proektirovanie sistem upravlenija / G.K. Gudvin, S.F. Grebe, M. Je. Sal'gado. – M.: Binom, 2004. – 912 s.
5. Ermakov O.A. Vybór i raschet kórréktirujushhih cepej dlja gidravlicheskoj sledjachej sistemy -M.: Madi, 1985. – 350s.
6. Lazarev Ju.A. Modelirovanie processov i sistem v MATLAB – SPb.: Izd. BHV, 2005. – 512 s. Osnovi tribologii (trenie, iznos, smazka): 2-e izd. pererab. i dop. / A.V. Chichinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obch. red. A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 664 s.

Таванюк Т.Я., Николаенко А.П., Романченко А.В., Шумакова Т.А., Логунов А.Н. Система автоматического управления технологическим оборудованием

Представлена система автоматического управления технологического оборудования, учитывающая стохастические возмущающие воздействия и шумы наблюдения. Обоснованно использование комбинированной системы управления оборудованием. Выполнен синтез наблюдателя Калмана-Бьюси и оптимального линейного регулятора.

Ключевые слова: динамические характеристики; корректирующее звено; наблюдатель Калмана; стохастические воздействия.

Tavanyuk T., Nikolaienko A., Romanchenko A., Shumakova T., Logunov O. Automatic control system of technological equipment

The system of automatic control of process equipment, taking into account stochastic disturbances and observation noises, is presented. The use of a combined equipment management system is justified. The synthesis of the Kalman-Bucy observer and the optimal linear regulator was performed. Simulation shows that the use of the Kalman-Bucy observer can suppress applied excitations, which leads to an improvement in the quality of transients.

Keywords: dynamic performance; corrective link; Kalman the observer; stochastic effects.

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) ttavanyuk@gmail.com

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) anikolaienko@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) shumakovatania@gmail.com

Логунов Олександр Миколайович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) logunov@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. Харламов Ю.О.

Стаття подана 14.02.2019.

УДК 621.793

**МЕХАНІЗМИ СХОПЛЮВАННЯ ЧАСТИНОК З ОСНОВОЮ
ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ****Харламов Ю.О.****ABOUT MECHANISMS OF PARTICLES BONDING
WITH A SUBSTRATE DURING THERMAL SPRAYING****Kharlamov Y.**

Розглянуто проблеми моделювання схоплювання частинок з поверхню деталі при газотермічному напиленні покриттів. Формування адгезійної і когезійної міцності газотермічних покриттів розглядається з позицій теорії зварювання матеріалів у твердій фазі. Утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частинок і деталі супроводжується деформаційними процесами в контактній зоні, що сприяють розвантаженню і розриву зв'язків в системі метал – кисень, завантаженню і утворенню зв'язків між атомами взаємодіючих матеріалів. Кінетика утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частки і основи при високих швидкостях зіткнення задовільно описується модифікованим рівнянням С.Н. Журкова, яке використовує експериментально вимірювані величини: величину розривної деформації міжатомний зв'язку, модуль Юнга, коефіцієнт термічного лінійного розширення. Показано можливий вплив нанотопографії поверхні основи на взаємодію з напилюваними частинками і утворення покриттів з високою адгезійною та когезійною міцністю.

Ключові слова: адгезійна та когезійна міцність, активація, газотермічне напилення, площа контакту, покриття, сплет, приварювання.

Вступ. Системний аналіз фізико-хімічних процесів і явищ при газотермічному напиленні показав важливу роль схоплювання і утворення міцних зв'язків при формуванні покриттів [1]. Адгезійна і когезійна міцність газотермічних покриттів є одними з їх найважливіших властивостей, що визначають їх практичне застосування.

Проблема моделювання схоплювання частинок з поверхню деталі є однією з основних в теорії і практиці газотермічного напилення покриттів (ГТНП). Досить докладний аналіз її міститься в багатьох роботах. Хімічна взаємодія між контактуючими матеріалами можлива за умови розриву зв'язків метал - кисень (Me - O) з боку кожної з контактуючих поверхонь і видалення із зони з'єднання ки-

сню [2-7]. Можливими каналами активації, що приводять до розриву міжатомних зв'язків в системі (Me - O), є [8]: 1. термічний; 2. механічний; 3. канал, пов'язаний з вивільненням енергії при виході на поверхню в результаті пластичної деформації структурних дефектів типу дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів; 4. хімічна активація (взаємодія шару оксиду або хімічно адсорбованого кисню з якою нібито речовиною за механізмом відновної реакції).

Існують і інші уявлення про утворення міцних газотермічних покриттів. Багато дослідників віддають перевагу механічній природі схоплювання, проте відсутні будь-які теорії, що дозволяють розрахувати міцність зв'язків які утворюються. Більш обґрунтованим є застосування теорії схоплювання матеріалів при зварюванні матеріалів у твердій фазі, розробленої Красуліним Ю.Л. і Шоршоровим М.Х. [3]. Відповідно до цих уявлень [2] взаємодія матеріалів підкладки і часток при газотермічному напиленні на локальних ділянках поверхні представляється у вигляді трьох послідовно протікаючих стадій: 1) зближення матеріалів до утворення фізичного контакту між ними, тобто на відстань, близьку до величини параметра решітки; 2) активація контактуючих поверхонь і хімічна взаємодія матеріалів на границі розділу фаз; 3) об'ємний розвиток взаємодії, що веде до взаємного проникнення матеріалів частинки і підкладки внаслідок дифузійного масопереносу через границю з вже встановленими хімічними зв'язками.

Утворення фізичного контакту передуює хімічній взаємодії, що в кінцевому шарі визначає фактичну площу контакту, на якій формуються міцні зв'язки. Досить добре вивчено взаємодію створеного фізичного контакту одиночних частинок з гладкою поверхню [2]. Необхідність врахування реального мікрорельєфу поверхні основи на формування контакту і освіту міцних зв'язків з напилюваними час-

тинками розглянута в роботі [6], в якій розглянуто модель деформування сферичного мікровиступу при зіткненні з часткою і її подальшому розтіканні. У ряді робіт шорсткість основи моделюється також призматичними виступами прямокутної і трикутної форми. Однак у всіх цих роботах не враховується наявність на реальних поверхнях субшероховатості на нанорівні.

Мета даної роботи полягає в аналізі та пошуку нових підходів до механізмів схоплювання і з'ясуванні можливого впливу нанотопографії поверхні основи на взаємодію з напилюваними частинками та створення покриттів з високою адгезійною та когезійною міцністю.

Основні результати. При газотермічному напиленні покриття формується з величезної кількості частинок вихідного матеріалу. Так, для формування покриття товщиною 0,5 мм може використовуватися більш 10^{10} - 10^{11} частинок на 1 м^2 . Причому антикорозійні властивості покриття залежать головним чином від складу матеріалу покриття, а його термомеханічні властивості не тільки від складу матеріалу, а й значною мірою від остаточного розміру і форми кристалів, міжчасткових контактів і характеру схоплювання (зчеплення) на поверхнях контакту. Тому для отримання покриттів високої якості з необхідними хімічними, фізичними і механічними властивостями розробники покриттів і технологій їх отримання повинні передбачити формування покриттів з частинок оптимального розміру і форми, та міцного зчеплення між частинками і частинок з основним матеріалом виробу.

При зіткненні частинок з поверхнею утворюються напилені частки (сплети) різноманітної форми, яка сильно залежить від властивостей матеріалів частинок і поверхні, стану поверхні або попередньо напилених шарів, а також від критичних параметрів процесу: температури частинок, швидкості частинок (головним чином її нормальної складової) і температури поверхні. У роботах Кудінова В.В. з співавторами вивчена поверхня основи під привареною, а потім механічно віддаленою часткою (сплетом) [2]. При зіткненні частинки з основою в їхньому контакті утворюються осередки схоплювання з розмірами в поперечному напрямку 200-700 нм. В міру розвитку хімічної реакції число вогнищ збільшується і при міцності схоплювання, близькій до максимальної, вони практично зливаються, заповнюючи всю центральну область деформованої частки. Діаметр плями хімічного взаємодії звичайно трохи більше діаметра напилюваної частки. Механізм схоплювання частки розглядається з позиції теорії топомічної реакції при зварюванні в твердій фазі. При високих швидкостях зіткнення часток з поверхнею можна використовувати рівняння для швидкості хімічної реакції в наступному вигляді [7, 9]:

$$\frac{dx}{dt} = (N_0 - x) \nu \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT_k}\right), \quad (1)$$

де x - число атомів, що прореагували за час t ; N_0 - число атомів на поверхні твердого тіла або частинки в зоні їх взаємного контакту; ν - частота власних коливань атомів; U_0 - енергія активації утворення хімічних зв'язків; T_k - абсолютна температура контакту; k - постійна Больцмана; σ - напруги, що діють в зоні контакту при протіканні хімічної реакції; γ - структурно чутливий коефіцієнт, запропонований в кінетичній теорії міцності твердих тіл і оцінює активаційний об'єм і перенапруги на міжатомних зв'язках порівняно із середнім напругою в зразку [10].

Напруги знижують енергетичний бар'єр U_0 , необхідний для розриву зв'язків в системі тверда поверхня - кисень (Me - O) на величину $\gamma\sigma$ і в результаті зменшення бар'єру ймовірність розриву зв'язків різко збільшується. Однак відсутність теорії коефіцієнта γ , залежність значення енергії активації U_0 від температури, напруженого стану та інших чинників ускладнюють практичне використання рівняння (1) в інженерних розрахунках.

Значення V_0 і γ висловлюють через константи твердого тіла, експериментально вимірювані величини: атомну теплоємність C , коефіцієнт термічного лінійного розширення α і модуль Юнга E [11, 12]

$$\gamma = \frac{C}{\alpha E}, \quad U_0 = \varepsilon^* \frac{C}{\alpha}, \quad (2)$$

де $\chi = \Sigma / \sigma$ - коефіцієнт локальної перевантаження, Σ і σ - відповідно локальне і середня напруга, ε^* - відносне подовження, при якому міжатомні зв'язки втрачає стійкість і розривається ($\varepsilon^* = 0.2$). Приймаючи для одноатомних кристалів $C = 3k$, рівняння Журкова С.Н. приводиться до вигляду:

$$\tau = \tau_0 \exp\left[\frac{3(\varepsilon^* - \chi\sigma / E)}{q\alpha T}\right]. \quad (3)$$

Тут $q = \alpha_s / \alpha$, α_s - коефіцієнт термічного розширення на поверхні твердого тіла; τ - довговічність твердого тіла при механічному навантаженні; $\tau_0 = \nu^{-1} \approx 10^{-13}$ с. За допомогою сучасних фізичних методів: дифракція повільних електронів і спектроскопії поверхні показано, що α_s в кілька разів більше α . При кімнатній температурі для Al $q = 2.5$, для Mo $q = 10$ [11, 12].

Відповідно до уявлень, що розвиваються в роботах [11, 12], параметр ε^* характеризує теоретичну міцність міжатомних зв'язку, $q\alpha T$ - флуктуючий тепловий тиск, розтягують міжатомні зв'язку. Параметр $\gamma\sigma/E$ відображає зовнішнє навантаження. При належному напрямку прикладання навантаження зовнішнє навантаження деформує міжатомні зв'язку і розриває їх. Облік нелінійності міжатомних сил докорінно змінює ситуацію в проблемі схоплювання матеріалів. Міцність зв'язків, що утворюються залежить від термофлуктуаційного чинника

$$\exp \frac{3\varepsilon_*}{q\alpha T_k} = \beta, \quad (4)$$

і механічного фактора

$$\exp \frac{3\chi\sigma / E}{q\alpha T_k}. \quad (5)$$

Збільшення міцності зчеплення частинок з поверхнею деталі може бути досягнуто зменшенням термофлуктуаційного чинника β або збільшенням механічного фактора θ . Перше досягається збільшенням температури в контакті T_k або коефіцієнта α . Друге досягають збільшенням напруги, докладених до міжатомним зв'язків.

Використовуючи (2) і (3) рівняння (1) можна привести до виду

$$\frac{dx}{dt} = (N_0 - x)v \exp \left[-\frac{3(\varepsilon_* - \chi\sigma / E)}{q\alpha T_k} \right]. \quad (6)$$

Після інтегрування (6) при $T_k = \text{const}$ і підстановки ($t = 0, x = 0, t = t_0, x = N_0$) отримуємо тривалість реакції, в продовж якої прореагує N атомів:

$$t_\alpha = \frac{1}{v} \ln \left[\frac{N}{N_0 - N} \right] \exp \left[\frac{3(\varepsilon_* - \chi\sigma / E)}{q\alpha T_k} \right] \quad (7)$$

або

$$t_\alpha = -\frac{1}{v} \ln \left[1 - \frac{N}{N_0} \right] \exp \left[\frac{3(\varepsilon_* - \chi\sigma / E)}{q\alpha T_k} \right] \quad (8)$$

Теоретичний вираз зміни відносної міцності зчеплення частинок з поверхнею в результаті протікання хімічної реакції в контакті можна отримати з виразі (9)

$$\frac{N(t)}{N} = \frac{\sigma_a(t)}{\sigma_{a\max}} = 1 - \exp \left[-\frac{vt_a}{\exp \left[3(\varepsilon_* - \chi\sigma / E) / q\alpha T_k \right]} \right], \quad (9)$$

де $\sigma_a(t)$ - досягнута за час t_a міцність зчеплення; $\sigma_{a\max}$ - максимально досяжна міцність зчеплення; $N(t)$ - кількість атомів, що прореагували за час t .

Пружно-деформований стан контактної зони частки з деталлю глибоко специфічен і може бути охарактеризован за аналогією з процесом зовнішнього тертя [13] наступними особливостями: 1) високим значенням відношення поверхні до деформованого об'єма. Тут реалізується прямий силовий вплив на субструктуру поверхні в зоні фактичного контакту з

часткою, тому пластична деформація локалізується в найтонших поверхневих шарах. Цей ефект різко посилюється при наявності на контактних поверхнях м'яких плівок і шарів. Цю ж роль виконують розм'якшені шари в результаті нерівномірного прогріву за об'ємом твердого тіла і частинок; 2) високою однорідністю (гомогенністю) пластичної деформації та аномальною пластичністю поверхневих шарів.

Якщо при об'ємному навантаженні розподіл напружень на субмікроскопічному рівні пов'язан з властивістю дефектної структури концентрувати напруги і релаксувати їх за рахунок реалізації елементів легкого переміщення, то при терті розподіл напружень визначається фізичним контактом, що робить практично рівно можливим переміщення всіх елементів структури. Це дозволяє прийняти величину коефіцієнта локального перевантаження $\chi = 1$.

При схоплюванні частинок з поверхнею твердого тіла по термофлуктуаційному механізму для розриву зв'язків в системі (Me - O) до адсорбованих на поверхні деталі атомів кисню повинні бути додані розтягувальні навантаження. Чи можливо це в процесі зіткнення часток з поверхнею? Реальні поверхні характеризуються наявністю великої кількості кристалографічних дефектів, основними з яких є точки виходу дислокацій, сліди виходу кордонів зерен і ін. Тому при розтіканні часток по поверхні, виходу свіжих дефектів на контактну поверхню, додаток розтягувальних навантажень на окремі міжатомні зв'язки адсорбованих атомів можлив, а, отже, розглянута термофлуктуаційна модель схоплювання має місце при умові забезпечення одночасного протікання актів атомних перегрупувань. Найбільш сприятливі умови для цього створюються в периферійних кільцевих зонах контакту частинки з деталлю.

На рис. представлені розрахункові залежності (по (9)) відносної міцності зчеплення частинок Cu з поверхнею зразка з Mo при різних значеннях швидкості зіткнення (100; 500; 700; 1000 м/с). Там же наведені експериментальні залежності, отримані переворотенням температури підкладки T_s на контактну температуру T_k . У розрахунках приймалися наступні значення параметрів: $q = 10$; $\alpha = 0.56 \cdot 10^{-5}$; E в МН/м^2 при температурі в К: 300 - $3.23 \cdot 10^5$; 400 - $3.17 \cdot 10^5$; 500 - $3.11 \cdot 10^5$; 600 - $3.05 \cdot 10^5$; 700 - $2.99 \cdot 10^5$; 800 - $2.93 \cdot 10^5$; 900 - $2.87 \cdot 10^5$; 1000 - $2.81 \cdot 10^5$; $\sigma = 0$ при $V_0 = 100$ м/с; $\sigma = 2400$ МН/м^2 при $V_0 = 500$ м/с; $\sigma = 4000$ МН/м^2 при $V_0 = 700$ м/с і $\sigma = 9000$ МН/м^2 при $V_0 = 1000$ м/с. З аналізу розрахункових залежностей маємо вельми важливі висновки:

1. характер розрахункових залежностей для відносної міцності зчеплення частинок з поверхнею при низьких швидкостях зіткнення з рівняння (9) збігається з аналогічними розрахунковими залежностями за відомим рівнянням топохімічної реакції першого порядку;
2. відносна міцність зчеплення частинок з поверхнею істотно залежить від діаметра частинок.

При однаковій швидкості удару зменшення діаметра частинок зменшує час зіткнення та вимагає для досягнення рівномірного зіткнення підогріва поверхні деталі до більш високих температур. Для розглянутого поєднання матеріалів зменшення діаметра частинок (і часу зіткнення) на порядок для отримання рівномірного з'єднання контактна температура повинна бути збільшена більш ніж на 100°C , а температура підкладки більш ніж на 150°C .

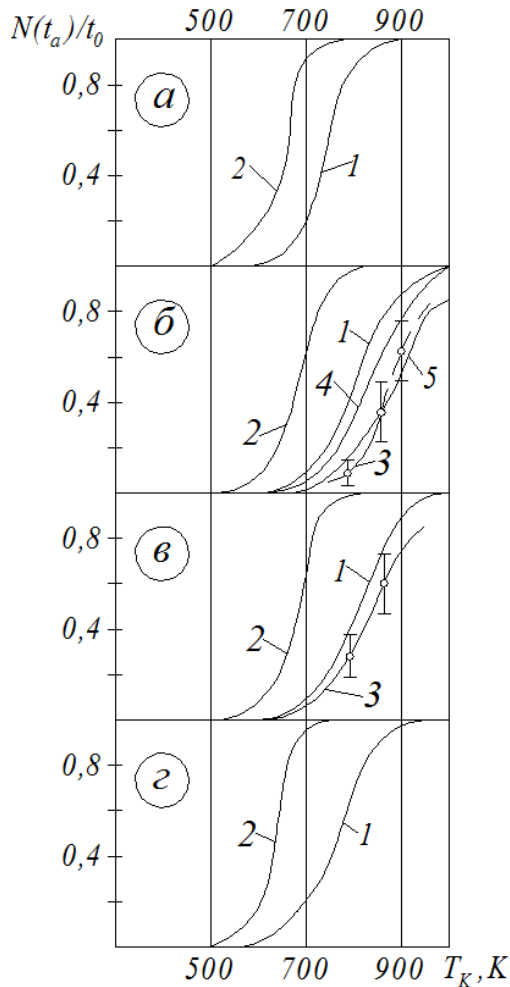


Рис. Розрахункові залежності відносної міцності зчеплення частинок міді з поверхнею Мо від температури контакту. Діаметр частинок V_0 , мкм: 10 (криві 1), 100 (криві 2); швидкість частинок V_0 , м/с: 100 (а), 500 (б), 700 (в), 1000 (г), для кривих 4 і 5 $V_0 = 0$ м/с. Час активування, t_{a3} , с: а - $1 \cdot 10^{-7}$ (1), $1 \cdot 10^{-6}$ (2); б - $1 \cdot 10^{-8}$ (5), $2 \cdot 10^{-8}$ (1,4), $2 \cdot 10^{-7}$ (2); в - $1,43 \cdot 10^{-8}$ (1), $1,43 \cdot 10^{-7}$ (2); г - $1 \cdot 10^{-8}$ (1), $1 \cdot 10^{-7}$ (2). Крива 3 отримана експериментально

3. збільшення швидкості частинок на відносну міцність зчеплення, що формується за термофлуктуаційним механізмом, впливає неоднозначно. При швидкостях удару, що не забезпечують різкого зростання напірного тиску і відповідно механічного фактора θ , з ростом швидкості частинок при однаковій контактній температурі відносна міцність зче-

плення зменшується. Це пояснюється зменшенням тривалості протікання реакції (часу зіткнення). При швидкостях удару, забезпечуючих різке зростання напірного тиску і відповідне збільшення механічного (атермічного) фактора θ , подальше зростання швидкості частинок при однаковій контактній температурі призводить до зростання міцності зчеплення в порівнянні з низькими швидкостями удару. Причому чим більше діаметр частинок, тим менше критичне значення швидкості частинок, при підвищенні якого відносна міцність зчеплення зростає. У розглянутому випадку для частинок діаметром 100 мкм $V_{кр} \approx 700$ м / с, а при $d_p = 10$ мкм $V_{кр} > 1000$ м / с.

4. при високих швидкостях удару нахил середніх ділянок кривих відносної міцності для різних діаметрів частинок неоднаковий. Чим більше діаметр частинок, тим криві відносної міцності крутіші, тим менше перепад значень між $N(t_a)/N_0 = 0$ і $N(t_a)/N_0 = 1$. Зі збільшенням швидкості частинок крутизна цих кривих також зростає.

5. експериментальні криві для відносної міцності зчеплення досить близькі до розрахункових вважали, що σ дорівнює границі міцності (для міді близько 150 МН/м^2).

Дана модель дозволяє врахувати такі основні параметри технологічного операційного процесу напилення, що впливають на схоплення частки з поверхнею основи, як температура поверхні основи, швидкість і температура часток, однак не враховує ряд важливих параметрів, і перш за все топографію поверхні основи, стан її приповерхневого шару та ін. Проблематичною є оцінка ряду фізичних параметрів, що входять в розрахункові рівняння.

Підготовка поверхні є одним з найбільш відповідальних етапів в процесі отримання газотермічних покриттів (ГТП). Обґрунтуванню вимог до неї і відповідним технологічним рекомендаціям присвячені розділи національних стандартів, а також численні публікації та дослідження. Огляд цих робіт наведено в [2, 4, 14, 15] і ін. Однак до теперішнього часу відомі рекомендації і результати досліджень носять суперечливий характер. Перш за все слід зазначити відсутність досить обґрунтованих вимог до параметрів мікрорельєфу поверхні, підготовленої до напилення. Так, за даними ряду робіт для досягнення максимальної міцності зчеплення необхідно забезпечити оптимальне співвідношення параметра шорсткості поверхні до середнього розміру напилюваних частинок. Як правило, максимальна міцність зчеплення досягається при певній шорсткості поверхні основи, одержуваної при струменево-абразивній обробці (САО) з оптимальною питомою витратою абразиву. За іншими даними, умовою для досягнення максимальної міцності зчеплення є певна тривалість обробки поверхні абразивом. Зі збільшенням питомої енергії абразиву при САО міцність зчеплення ГТП зростає, а потім з'являється тенденція до її зниження.

Спеціальна підготовка поверхні основи перед напиленням: струменево-абразивна обробка, шліфування і ультразвукова фінішна обробка (УФО) формують на кордоні розділу між покриттям і основою якісний адгезійний зв'язок. При цьому максимальна площа вогнищ схоплювання між покриттям і основою формується на поверхні після струменево-абразивної обробки (53 %), а мінімальна після шліфування поверхні основи (24 %) [4]. УФО основи сприяє утворенню надійного адгезійного зв'язку при нанесенні покриттів високошвидкісним газополуменим, плазмовим і детонаційними способом [16]. Адгезія забезпечується за рахунок високої щільності дефектів кристалічної будови і сприятливою топографією поверхні контакту. Визначено оптимальний для напилення мікрорельєф основи з УФО: періодичний з $Sm = 0,2$ мм і $Rz = 3,2$ мкм для рідких і високо нагрітих частинок, загрозованих зі швидкостями менше 600 м/с; однорідний з $Rz = 1,4$ мкм для помірно нагрітих частинок, загрозованих зі швидкостями понад 600 м/с.

Будь-який метод підготовки поверхні деталі до напилення забезпечує певні, специфічні особливості топографії. Залежно від характерних розмірів, в даний час прийнято умовно розділяти відхилення реальних технічних поверхонь від ідеальної геометричної форми на чотири рівні: макровідхилення форми (характерні розміри: крок менше 10^{-5} м, висота менше 10^{-5} м); хвилястість (крок менше 10^{-2} м, висота менше 10^{-4} м), шорсткість (крок менше 10^{-3} м, висота менше 10^{-4} м) і нанощорсткість або субшорсткість (крок менше 10^{-6} м, висота менше 10^{-7} м). Причому вказані межі умовні і можуть частково перекриватися [17].

Розроблені спочатку в рамках механіки і фізики контактної взаємодії моделі і методики розрахунку характеристик контакту не враховували наявність нанощорсткості, оскільки було відсутнє метрологічне забезпечення і технічні засоби вимірювання параметрів топографії поверхні і фізико-механічних властивостей матеріалів у відповідних масштабах. З появою таких інструментів дослідження поверхні, як атомний силовий мікроскоп і його різновиди, наномасштабний рівень став доступний для геометричних і фізико-механічних вимірювань, що відкрило нові можливості, зокрема, перед механікою і фізикою контактної взаємодії твердих тіл. В даний час розвивається теорія дискретного контакту поверхонь з нерівностями двох масштабних рівнів - шорсткості (перший масштабний рівень) і субшорсткості (другий масштабний рівень). Причому площа контакту, утворена сумою окремих площадок контакту нерівностей першого рівня, називають за усталеною термінологією фактичною площею контакту A_f ; площа контакту, утворена сумою окремих площадок контакту нерівностей другого рівня - фізичною площею контакту A_p [17].

Наявність чотирьох рівнів відхилення реальних технічних поверхонь від ідеальної геометричної форми дозволяє розглядати відповідно чотири види

площі контакту газотермічних покриттів з основою:

1. Номінальна - відповідає загальній площі покриття і визначається геометричними розмірами локальної ділянки поверхні з покриттям (або площею поверхні при її повному покритті). Номінальна площа контакту ГТП з основою на схоплення одиничних часток не впливає. Вона впливає на утворення залишкових напружень в покриттях і міцність їх зчеплення з основою.

2. Контурна - сума площ загального контакту одиничних сплетів з основою на границі їх розділу, які визначаються розмірами майданчиків щільного контакту часток з основою. Контурна площа контакту ГТП відповідає номінальній площі без урахування часу та інших несущальностей на границі розділу, мікроучастинок з проміжними речовинами, що перешкоджають взаємному контакту матеріалів частинки і основи, локальні ділянки відриву розтікаються частками від поверхні основи та ін. Для контакту ГТП з основою контурна площа порівнянна з номінальною, але трохи менше її, на відміну від дискретного контакту сполучених деталей.

3. Фактична - сума площ локальних ділянок хімічної взаємодії часток (сплетів) з основою, на яких відбувається схоплювання і утворюється міцне зчеплення частинок з основою [2]. Сумарна площа всіх ділянок між частинками, на яких утворилося міцне з'єднання, становить лише частину всієї площі їх контакту. Міцність в самій плямі схоплювання нижче міцності компактного матеріалу, що пояснюється макро- і мікроскопічною дефектністю утвореного з'єднання. Фактична площа контакту ГТП з основою також порівнянна з номінальною площею, але може бути нижче контурної або дорівнює їй.

4. Фізична. Термін «фізична площа контакту» вперше використаний авторами роботи [18], а потім в [1, 19]. Наявність на поверхні реальних твердих тіл поряд з мікросшорсткістю нерівностей наномасштабного рівня (нанощорсткості) призводить до необхідності уточнення поняття «площа контакту». Поряд з відомим в механіці контактної взаємодії поняттям «фактична площа контакту» вводиться поняття «фізичної площі контакту», під якою мається на увазі сумарна площа дискретних площадок контакту нерівностей наномасштабного рівня. Облік субшорсткості - нерівностей наномасштабного рівня, присутніх на поверхні деталі або попередньо напилених шарів покриття поряд з шорсткістю - призводить до уточнення поняття «площа контакту частинки з основою». Поряд з використовуваним в теорії газотермічного напилення поняттям «фактична площа контакту напилення частки (сплета) з поверхнею» слід використовувати аналогічне поняття «фізичної площі контакту», під якою слід розуміти сумарну площу дискретних площадок контакту нерівностей поверхні наномасштабного рівня з напилюваною часткою. Можна вважати, що саме на таких площадках контакту відбувається схоплювання взаємодіючих матеріалів.

Різниця площ контакту позначається на процесах, перебіг яких відбувається в точках безпосередньої атомарної взаємодії контактуючих поверхонь, в тому числі схоплювання. У міру збільшення швидкості частинок зростають тиски, що діють в контактній частині з поверхнею в момент удару і одночасно збільшується фізична площа їх контакту. Цим можна пояснити підвищену міцність зчеплення покриттів при високошвидкісних методах напилення. Вплив нерівностей наномасштабного рівня позначається на початкових стадіях зіткнення частинки і її розтікання.

Таким чином, наявність в реальності відхилень форми різного масштабного рівня призводить до істотних погрешностей у розрахунках характеристик контакту, якщо не враховувати їх впливу на деформацію напилюваних частинок і локальної ділянки основи. По-перше, наявність наношорсткості призводить до дискретності контакту частинки з основою в початковий момент зіткнення. Замість суцільної круглої площадки контакту зіткнення частинки з основою відбувається по вершинах контактуючих нерівностей, що утворюють ансамбль малих площадок контакту, розташованих в межах більшої так званої контурної площадки контакту. Така дискретність контакту частинки з основою дозволяє інакше розглядати процес утворення вогнищ схоплювання. Саме на вершинах нанонервностей починається процес деформації основи, генерування і вихід дислокацій, які є активними центрами. Зменшення характерних розмірів об'єкта або елементів його структури до $R^* \leq 1 \mu\text{m}$ (хоча б в одному з трьох вимірів) тягне істотна зміна його механічних властивостей [20, 21]. Особливо сильні розмірні ефекти виникають при $R^* \leq 100 \text{ nm}$, а при $R^* \leq 10 \text{ nm}$ їх характер може змінитися радикально ще раз. З цього випливає, що механічне поведінка твердих тіл в нанощкале не може бути виведено шляхом простої екстраполяції з макро- або мікрообласті, що істотно впливає на механізм і кінетику схоплювання частинок з основою.

Висновки. 1. Схоплювання напилюваних частинок з поверхнею виробу супроводжується складним комплексом фізико-хімічних процесів і явищ. Адгезійна та когезійна міцність покриттів залежить від великої кількості факторів, але їх вплив проявляється через зміну характеру і інтенсивності деформаційних і теплових процесів в зоні контакту взаємодіючих матеріалів. Можна вважати, що в залежності від багатфакторних умов напилення схоплювання частинок з основою може відбуватися за різними механізмами, одні з яких можуть бути провідними, а інші супутніми.

2. Утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частинок і деталі супроводжується деформаційними процесами в контактній зоні, що сприяють розвантаженню і розриву зв'язків в системі метал-кисень, завантаження і утворення зв'язків між атомами взаємодіючих матеріалів.

3. Кінетика утворення міжатомних зв'язків між матеріалами частки і основи при високих швидкостях зіткнення задовільно описуються модифікованим рівнянням С.Н. Журкова, що використовують експериментально вимірювані величини: величину розривної деформації межатомного зв'язку ($\epsilon^* \approx 0.2$), модуль Юнга, коефіцієнт термічного лінійного розширення.

3. Перспективним є вивчення впливу нанотопографії поверхні основи на взаємодію з напилюваними частинками, механізм їх схоплювання і на основі їх результатів розробка рекомендацій по підготовці різних поверхонь під напилення.

Л і т е р а т у р а

1. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 5. – С.13-24.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория технология и оборудование. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
3. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
4. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, К.В. Зайцев, А.И. Толмачев // Известия Томского политехнического университета. – 2007. Т. 310. № 3. – С.57-61.
5. О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении / Т.П. Гавриленко, Ю.А. Николаев, Е.С. Прохоров, В.Ю. Ульяницкий // Физика горения и взрыва. – 1990. - Т. 26, №2. - С. 110-123.
6. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. – Киев: Наукова думка, 1983. - 264 с.
7. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. - М.: Наука. - 1978. - 224 с.
8. Черноиванов В.И., Каракозов Э.С. Физико-химические процессы образования соединений при напылении порошковых материалов // Сварочное производство, 1984: - № 1, с.2-5; № 2, с.10-14; № 3, с. 29-31.
9. О механизме и кинетике формирования прочных покрытий при детонационно-газовом напылении / М.Х. Шоршоров, Ю.А. Харламов, В.В. Кудинов, О.В. Гусев // Защитные покрытия на металлах, вып.10. - К.: Наук. думка, 1976. - С.71-75.
10. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560 с.
11. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела, 1980, т.22, N 11. - С.3344-3349.
12. Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел. - Доклады АН СССР, 1978, т.239, N 6. - С.1316-1319.

13. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. - К.: Техніка, 1976. - 168 с.
14. Харламов Ю.А., Борисов Ю.С. Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка, 2001, № 6. - С.19-26.
15. Харламов Ю.А. Удар частиц при детонационно-газовом напылении – Северодонецк: изд-во СНУ, 2018. – 144 с.
16. Ковалевская Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке. Автореф. ... д.т.н. – Томск, 2018. – 33 с.
17. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Влияние нанотопографии поверхностей на характеристики дискретного контакта твердых тел // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. - Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. - Вып. 8. С.139-144.
18. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Наука і тэхніка, 1990. 272 с.
19. Измайлов В.В. О фактической и физической площадях дискретного контакта / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр.– Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. – Вып. 8. – С. 4-9.
20. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано-и микрообъемах / Ю.И. Головин, С.Н. Дуб, В.И. Иволгин, В.В. Коренков, А.И. Тюрин Физика твердого тела, 2005, том 47, вып. 6 - С.961- 973.
21. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор) // Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12. – С. 2113-2142.
7. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. - M.: Nauka. - 1978. - 224 s.
8. Chernoi Ivanov V.I., Karakozov Je.S. Fiziko-himicheskie processy obrazovanija soedinenija pri napylenii poroshkovykh materialov // Svarochnoe proizvodstvo, 1984: - № 1, s.2-5; № 2, s.10-14; № 3, s. 29-31.
9. O mehanizme i kinetike formirovanija prochnykh pokrytij pri detonacionno-gazovom napylenii / M.H. Shorshorov, Ju.A. Harlamov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev // Zashhitnye pokrytija na metallah, vyp.10. - K.: Nauk. dumka, 1976. - S.71-75.
10. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij Je.E. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel. - M.: Nauka, 1974. - 560 s.
11. Zhurkov S.N. K voprosu o fizicheskoj osnove prochnosti // Fizika tverdogo tela, 1980, t.22, N 11. - S.3344-3349.
12. Zhurkov S.N., Petrov V.A. O fizicheskikh osnovah temperaturno-vremennoj zavisimosti prochnosti tverdyh tel. - Doklady AN SSSR, 1978, t.239, N 6. - S.1316-1319.
13. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B.I. Kosteckij, I.G. Nosovskij, A.K. Karaulov i dr. - K.: Tehnika, 1976. - 168 s.
14. Harlamov Ju.A., Borisov Ju.S. Vlijanie mikrorel'efa poverhnosti na prochnost' sceplenija s gazotermicheskim pokrytijami // Avtomaticheskaja svarka, 2001, № 6. - S.19-26.
15. Harlamov Ju.A. Udar chastic pri detonacionno-gazovom napylenii – Severodonec'k: izd-vo SNU, 2018. – 144 s.
16. Kovalevskaia Zh.G. Struktura i svojstva poverhnostnyh sloev i pokrytij pri modifitsirujushhej ul'trazvukovoj obrabotke. Avtoref. ... d.t.n. – Tomsk, 2018. – 33 s.
17. Izmajlov V.V., Novoselova M.V. Vlijanie nanotopografii poverhnostej na harakteristiki diskretnogo kontakta tverdyh tel // Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Tekst]: mezhvuz. sb. науч. tr. / pod obshej redakciej V.M Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova. - Tver': Tver. gos. un-t, 2016. - Vyp. 8. S.139-144.
18. Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Petrokovec M.I. Mehanika diskretnogo frikcionnogo kontakta. Minsk: Navuka i tjechnika, 1990. 272 s.
19. Izmajlov V.V. O fakticheskoj i fizicheskoj ploshhadjah diskretnogo kontakta / V.V. Izmajlov, M.V. Novoselova // Mehanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tehnologicheskogo i jenergeticheskogo oborudovanija: mezhvuz. sb. науч. tr.– Tver': Tverskoj gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2015. – Vyp. 8. – S. 4-9.
20. Kineticheskie osobennosti deformacii tverdyh tel v nano-i mikroob'emah / Ju.I. Golovin, S.N. Dub, V.I. Ivolgin, V.V. Korenkov, A.I. Tjurin Физика твердого тела, 2005, том 47, вып. 6 - S.961- 973.
21. Golovin Ju.I. Nanoindentirovanie i mehanicheskie svojstva tverdyh tel v submikroob'emah, tonkih pri-poverhnostnyh slojah i plenkah (Obzor) // Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12. – S. 2113-2142.

References

1. Shorshorov M.H., Kudinov V.V., Harlamov Ju.A. Sostojanie i perspektivy razvitija nanesenija pokrytij raspyleniem // Fizika i himija obrabotki materialov. – 1977. – № 5. – S.13-24.
2. Kudinov V.V., Bobrov G.V. Nanesenie pokrytij napyleniem. Teorija tehnologija i oborudovanie. – M.: Metallurgija, 1992. – 432 s.
3. Karakozov Je.S. Soedinenie metallov v tverdoj faze. – M.: Metallurgija, 1976. – 264 s.
4. Issledovanie adgezii pokrytij, poluchennyh vysokoskorostnym gazoplammennym napyleniem / V.A Klimenov, Zh.G. Kovalevskaia, K.V. Zajcev, A.I. Tolmachev // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2007. T. 310. № 3. – S.57-61.
5. O mehanizmah obrazovanija pokrytij pri gazotermicheskom napylenii / T.P. Gavrilenko, Ju.A. Nikolaev, E.S. Prohorov, V.Ju. Ul'janickij // Fizika gorenija i vzryva. – 1990. - T. 26, №2. - S. 110-123.
6. Maksimovich G.G., Shatinskij V.F., Kopylov V.I. Fiziko-himicheskie processy pri plazmennom napylenii i razrushenii materialov s pokrytijami. – Kiev: Naukova dumka, 1983. - 264 s.
7. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. - M.: Nauka. - 1978. - 224 s.
8. Chernoi Ivanov V.I., Karakozov Je.S. Fiziko-himicheskie processy obrazovanija soedinenija pri napylenii poroshkovykh materialov // Svarochnoe proizvodstvo, 1984: - № 1, s.2-5; № 2, s.10-14; № 3, s. 29-31.
9. O mehanizme i kinetike formirovanija prochnykh pokrytij pri detonacionno-gazovom napylenii / M.H. Shorshorov, Ju.A. Harlamov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev // Zashhitnye pokrytija na metallah, vyp.10. - K.: Nauk. dumka, 1976. - S.71-75.
10. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij Je.E. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel. - M.: Nauka, 1974. - 560 s.
11. Zhurkov S.N. K voprosu o fizicheskoj osnove prochnosti // Fizika tverdogo tela, 1980, t.22, N 11. - S.3344-3349.
12. Zhurkov S.N., Petrov V.A. O fizicheskikh osnovah temperaturno-vremennoj zavisimosti prochnosti tverdyh tel. - Doklady AN SSSR, 1978, t.239, N 6. - S.1316-1319.
13. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B.I. Kosteckij, I.G. Nosovskij, A.K. Karaulov i dr. - K.: Tehnika, 1976. - 168 s.
14. Harlamov Ju.A., Borisov Ju.S. Vlijanie mikrorel'efa poverhnosti na prochnost' sceplenija s gazotermicheskim pokrytijami // Avtomaticheskaja svarka, 2001, № 6. - S.19-26.
15. Harlamov Ju.A. Udar chastic pri detonacionno-gazovom napylenii – Severodonec'k: izd-vo SNU, 2018. – 144 s.
16. Kovalevskaia Zh.G. Struktura i svojstva poverhnostnyh sloev i pokrytij pri modifitsirujushhej ul'trazvukovoj obrabotke. Avtoref. ... d.t.n. – Tomsk, 2018. – 33 s.
17. Izmajlov V.V., Novoselova M.V. Vlijanie nanotopografii poverhnostej na harakteristiki diskretnogo kontakta tverdyh tel // Fiziko-himicheskie aspekty izuchenija klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Tekst]: mezhvuz. sb. науч. tr. / pod obshej redakciej V.M Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova. - Tver': Tver. gos. un-t, 2016. - Vyp. 8. S.139-144.
18. Sviridenok A.I., Chizhik S.A., Petrokovec M.I. Mehanika diskretnogo frikcionnogo kontakta. Minsk: Navuka i tjechnika, 1990. 272 s.
19. Izmajlov V.V. O fakticheskoj i fizicheskoj ploshhadjah diskretnogo kontakta / V.V. Izmajlov, M.V. Novoselova // Mehanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detalej tehnologicheskogo i jenergeticheskogo oborudovanija: mezhvuz. sb. науч. tr.– Tver': Tverskoj gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2015. – Vyp. 8. – S. 4-9.
20. Kineticheskie osobennosti deformacii tverdyh tel v nano-i mikroob'emah / Ju.I. Golovin, S.N. Dub, V.I. Ivolgin, V.V. Korenkov, A.I. Tjurin Физика твердого тела, 2005, том 47, вып. 6 - S.961- 973.
21. Golovin Ju.I. Nanoindentirovanie i mehanicheskie svojstva tverdyh tel v submikroob'emah, tonkih pri-poverhnostnyh slojah i plenkah (Obzor) // Физика твердого тела, 2008, том 50, вып. 12. – S. 2113-2142.

Харламов Ю.А. О механизмах схватывания частиц с основой при газотермическом напылении

Рассмотрены проблемы моделирования схватывания частиц с поверхностью детали при газотермическом напылении покрытий. Формирование адгезионной и когезионной прочности газотермических покрытий рассматривается с позиций теории схватывания материалов в твердой фазе. Образование межатомных связей между

материалами частиц и детали сопровождается деформационными процессами в контактной зоне, способствующими разгрузке и разрыву связей в системе металл – кислород, загрузке и образованию связей между атомами взаимодействующих материалов. Кинетика образования межатомных связей между материалами частицы и основы при высоких скоростях соударения удовлетворительно описываются модифицированным уравнением С.Н. Журкова, использующим экспериментально измеряемые величины: величину разрывной деформации межатомной связи ($\varepsilon^* \approx 0.2$), модуль Юнга, коэффициент термического линейного расширения. Показано возможное влияние нанотопографии поверхности основы на взаимодействие с напыляемыми частицами и образование покрытий с высокой адгезионной и когезионной прочностью.

Ключевые слова: адгезионная и когезионная прочность, активация, газотермическое напыление, площадь контакта, покрытие, сплэт, схватывание.

Kharlamov Y. About mechanisms of particles bonding with a substrate during thermal spraying

The problems of simulating the bonding of particles with the surface of a part during the thermal spraying of coatings are considered. The formation of adhesion and cohesive strength of thermal sprayed coatings is considered from the standpoint of the theory of welding of materials in the solid phase. The formation of interatomic bonds between the mate-

rials of particles and parts is accompanied by deformation processes in the contact zone, facilitating the unloading and breaking of bonds in the metal-oxygen system, loading and the formation of bonds between the atoms of the interacting materials. The kinetics of the formation of interatomic bonds between the materials of the particle and the substrate at high velocities of collisions are satisfactorily described by the modified equation of S.N. Zhurkov. Using the experimentally measured quantities: the magnitude of the discontinuous deformation of the interatomic bond ($\varepsilon^* \approx 0.2$), Young's modulus, the coefficient of thermal linear expansion. The possible effect of nanotopography of the substrate surface on the interaction with the sprayed particles and the formation of coatings with high adhesive and cohesive strength is shown.

Key words: adhesion and cohesive strength, activation, bonding, thermal spraying, contact area, coating, splat.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 07.02.2019.

УДК 621.793

ВПЛИВ УМОВ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВОГО НАПИЛЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ КАРБІДУ ВОЛЬФРАМУ І ХРОМУ

Харламов Ю.О.

INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF D-GUN SPRAYING ON THE PROPERTIES OF COATINGS ON THE BASIS OF TUNGSTEN AND CHROME CARBIDES

Kharlamov Y.

Детонаційно-газове напилення належить до одних з перспективних способів отримання покриттів в високотехнологічних галузях. Властивості карбідів вольфраму і хрому зумовлюють їх застосування для отримання захисних і функціональних покриттів. Розглянуто особливості отримання газотермічних покриттів на основі цих карбідів, у тому числі сприятливі значення параметрів труднощі плавлення і коефіцієнтів акумуляції тепла. Вивчено вплив видів порошків по способам їх отримання, складу, розмірам, введення в детонаційну камеру згоряння, дистанції напилювання на структуру, мікротвердість і пористість покриттів. Показана можливість отримати якісних покриттів з дрібнодисперсних порошків.

Ключові слова: детонаційно-газове напилення; дистанція напилення; камера згоряння; мікротвердість; покриття; пористість; порошок; карбід вольфраму; карбід хрому

1. Вступ. Технології газотермічного напилення покриттів (ГТНП) відносяться до наукоємних і застосовуються перш за все у високотехнологічних галузях - аерокосмічної, точному машинобудуванні та ін., що стимулює проведення надалі інтенсивних досліджень і розробок. Порівняно недавно теорія і практика ГТНП розвивалися в напрямку пошуку та вдосконалення способів, заснованих на термічних механізмах формування покриттів. В даний час реалізовані і здійснюється поступовий перехід до високошвидкісних методів напилення, в яких формування покриттів засноване на використанні механічного активування взаємодіючих матеріалів. Технології газотермічного напилення поповнилася такими новими методами, як детонаційно-газове, високошвидкісне газополум'яне, а в кінці 1990-х - холодное напилення [1, 2]. Для газотермічного напилення використовують спеціально пристосовані для цих процесів порошки, причому в номенклатурі таких матеріалів значну частку займають порошки на основі карбідів вольфраму і хрому. Однак в науково-технічній літературі є суперечливі дані по порівняльним властивостями газотермічних покриттів, які

мають тугоплавкі карбіди. Необхідно провести додаткові дослідження, в яких порівняння властивостей покриттів проводилося б для одного і того ж складу матеріалу і з урахуванням того, чи є режим напилення оптимальним для володіє даною структурою матеріалу, тобто забезпечує найкращі експлуатаційні властивості покриття. Має сенс порівняти покриття аналогічного складу і володіють найкращими характеристиками, які можна отримати варіюванням режимів напилення. Метою даної статті є аналіз результатів експериментального дослідження впливу умов детонаційно-газового напилення на властивості покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому.

2. Тугоплавкі карбіди і їх застосування. Карбіди вольфраму і хрому мають високу температуру плавлення, високу твердість в широкому діапазоні температур, мають високу жаростійкість і стійкість до агресивних середовищ і ін. Вони отримали широке застосування в якості основного компонента спечених твердих сплавів, для отримання різноманітних функціональних покриттів, в тому числі газотермічним напиленням, та ін.

Карбід вольфраму має гексагональну кристалічну решітку. Карбід вольфраму має високу твердість (9 за шкалою Мооса) і зносостійкість. Кристали карбіду вольфраму мають анізотропію твердості в різних кристалографічних площинах, так в залежності від орієнтації мінімальне значення мікротвердості складає 13 ГПа, а максимальне 22 ГПа [3, 4]. Інші властивості: твердість по Роквеллу 92-94 HRA; модуль пружності 710 ГПа; коефіцієнт лінійного теплового розширення $(3,84 \dots 3,9) \cdot 10^{-6}$ 1/К. Існує два карбіди вольфраму - WC і W₂C. Монокарбід WC містить 6,12% (по масі) C і розкладається при 1600 °C по перитектичеської реакції. При цьому утворюється рідка фаза, яка містить 5,5% C і графіт. Монокарбід або γ -фаза (твердий розчин на основі WC) має дуже низьку область гомогенності. Незначні втрати вуг-

лецю обумовлюють перехід WC в нижчий карбід W_2C (або β -фаза- твердий розчин на основі W_2C) і графіт: $2WC \rightarrow W_2C + C$. Карбід W_2C містить 3,2% (по масі) C. Однак твердий розчин на його основі (β -фаза) має концентрацію вуглецю приблизно від 2,5 до 3,6% (по масі). Тому існує широка область гомогенності фаз на основі W_2C . Температура плавлення W_2C становить 2760 °C, густина 17,2 г/см³, мікротвердість $(28 \dots 31) \cdot 10^3$ МПа. Сплави WC-Co є найбільш міцними з усіх відомих твердих сплавів.

Карбід хрому (Cr_3C_2) є впорядкованою фазою з дуже вузькою областю гомогенності, вміст вуглецю становить 13,34% по масі. Має ромбічну кристалічну ґратницю, в якій кожен з 8 атомів вуглецю розташований в центрі тригранної призми, в кутах якої знаходяться атоми хрому. Коефіцієнт лінійного теплового розширення $11,7 \cdot 10^{-6}$ 1/K (20...1100 °C). Мікротвердість карбиду хрому дорівнює 10,4...20,2 ГПа, що пов'язано з анізотропією кристалічної решітки. Модуль пружності 372 ГПа. Серед карбідів перехідних металів IV, V, VI груп, карбід хрому є найстійкішим при високотемпературному окисненні. Карбід хрому може входити до складу різних керметів і покриттів, що працюють в умовах зносу, підвищених температур і в агресивних середовищах. Є основним компонентом безвольфрамових твердих сплавів марки КХН (карбід хрому - нікель). Близькість коефіцієнта термічного розширення Cr_3C_2 до КТР стали дозволяє наносити карбідохромові покриття, в яких відсутні значні залишкові напружки [3, 4].

3. Порошки на основі карбідів вольфраму і хрому для газотермічного напилення. Порошки карбідів для газотермічного напилення отримують спіканням, конгломеруванням і спіканням, плакуванням і сфероїдізацією. Їх застосовують головним чином при таких способах напилення, як полум'яне електродугове, високошвидкісне газополум'яне, детонаційно-газове, а менш обмежено і іншими способами. Характеристики порошків і способи їх виробництва докладно описані в літературі [5-8], більш детальну інформацію можна знайти в проспектах відповідних виробників. Так, наприклад, компанія FST (FLAME SPRAY TECHNOLOGIES), Нідерланди випускає близько 60 марок порошків на основі карбиду вольфраму для газотермічного напилення [9]. Для високошвидкісного газополум'яного напилення призначені агломеровані і спечені низьковуглецеві (3.6 - 4.1% C), грубозернисті сферичні порошки WC-Co-88/12 марок AMPERIT 512.059 (розмір часток 30/5 мкм) і AMPERIT 512.074 (45/15 мкм). Для плазмового напилення призначені спечені і подрібнені з дуже великим WC (вуглець: 3.9 - 4.3%) порошки WC-Co - 88/12 марок AMPERIT 515.001 (45/22 мкм), AMPERIT 515.002 (90/45 мкм) і AMPERIT 515.074 (45/15 мкм). Отримують тверді, щільні покриття з хорошою стійкістю до абразивного, ерозійного і адгезійного зносу деталей машин. У цій же групі виробляються порошки AMPERIT марок: 515.203; 515.400; 515.401; 515.830; 515.851;

615.949. Лінійка карбідних порошків AMPERIT дає унікальну гнучкість у виборі порошків з необхідними розмірами карбідних частинок і металевою матрицею. Порошки для газотермічного напилення, що містять карбід вольфраму, наприклад, такі, як AMPERIT 554-558 WC-Co-Cr, AMPERIT 512-528 WC-Co і AMPERIT 547 WC-Ni можуть використовуватися при температурах нижче 500 °C. Покриття з карбиду вольфраму характеризуються надзвичайно високою зносостійкістю, а додавання хрому в металеву матрицю значно покращує корозійну стійкість.

При температурах вище 500 °C покриття з карбиду вольфраму не забезпечують необхідну стійкість до окислення. У цьому випадку доцільно використовувати покриття на основі карбиду хрому (наприклад, порошок AMPERIT 584-588 карбиду хрому з нікель-хромової матрицею (CrC-NiCr)), які забезпечують ефективний захист від гарячої газової корозії в деталях газових турбін або від окислення і зносу корпусів насосів, валів і деталей машин - навіть при температурах до 870 °C. Шляхом зміни змісту матриці від 10 до 50 відсотків можна підібрати необхідне поєднання твердості і пластичності покриття для конкретного застосування.

У даній роботі вивчали структуру і властивості композиційних покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому. В якості вихідного застосовували такі порошки: 1. механічні стандартні суміші порошків WC-8% Co (BK8) і WC-15% Co (BK15); 2. порошки сплавів WC-4% Co (BK4) і WC-8% Co (BK8), отримані дробленням спечених заготовок; 3. конгломерування порошки сплаву WC-15% - NiCrSiB (ВСНГН-85); 4. конгломерування порошки сплавів WC-25% Co (BK25) і WC-18% Co (BK18C); 5. механічні суміші порошків WC- Ni; 6. конгломерування порошки сплаву $Cr_xCu - Ni$ (КХН); 7. механічні суміші порошків карбідів хрому і нікелю типу КХН.

4. Особливості отримання ГТП покриттів на основі тугоплавких карбідів. Карбід вольфраму і хрому відносяться до з'єднань металлоїдного типу. При їх ГТП необхідно враховувати виборче окислення і випаровування елемента металоїди при нагріванні, дисоціації та сублімації. Формування газотермічних покриттів може здійснюватися як з розплавлених частинок порошку, так і в в'язкопластичному стані при досить високій швидкості їх зіткнення з деталлю. Ступінь проплавлення частинок порошку в напилювальному струмені можна оцінити за допомогою параметра труднощі плавлення матеріалу [6] $D = (i_{пл} - n_Q Q_{екз})^2 \rho_p (1 + 0,2Bi)^2$, де $i_{пл}$ - вагова ентальпія матеріалу розплавлених частинок; $Q_{екз}$ - питома ваговий екзотермічний ефект взаємодії в обсязі частки; n_Q - ступінь використання екзотермічного ефекту при нагріванні частинки; ρ_p - густина матеріалу частинки; Bi - критерій Біо, що враховує теплофізичні властивості матеріалу частинки і джерела теплоти в процесі теплообміну, а при

відсутності або малості екзотермічної теплового ефекту і значеннях $Bi < 0,2$ $D = i_{пл}^2 \rho_p$.

Параметр труднощі плавлення виражає відношення кількості тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму частинки, до часу перебування частинки в зоні нагріву, в свою чергу визначається густиною матеріалу частинки. При зіткненні частинок з деталлю і формування шару покриття важливу роль відіграє коефіцієнт акумуляції часткою теплоти, $b = \sqrt{C_p \rho_p \lambda_p}$, де C_p , ρ_p , λ_p - теплоємність, густина і теплопровідність матеріалу частинки. Карбід вольфраму і хрому мають відносно низькі значення параметрів труднощі плавлення: для WC $D = 2,1 \cdot 10^{10}$ кДж²·кг⁻¹·м⁻³, для Cr₃C₃ $D = 2,28 \cdot 10^{10}$ кДж²·кг⁻¹·м⁻³, що сприятливо для газотермічного нанесення покриттів. Коефіцієнти акумуляції тепла у них нижче або одного порядку з чистими металами, його значення для WC - 10^5 , для Cr₃C₃ - 10^6 Вт·м⁻²·К·с^{-0,5} [10]. Густина карбиду Cr₃C₃ - 6600 кг/м³, WC - 15600 кг/м³. Частинки карбиду хрому мають більш низьке значення часу скоростной релаксації і відповідно перебування в високотемпературном напилювальному потоці. При напиленні покриттів на основі карбиду вольфраму слід враховувати його високу схильність до зневуглюцювання, а після реакції окислення монокарбід розкладається. Процес окислення частинок карбиду хрому припиняється при створенні на їх поверхні оксидної плівки Cr₂O₃. Втрати вуглецю при газотермічному напиленні карбиду хрому невеликі (0,1 ... 0,3%).

5. Вплив умов детонаційно-газового напилення на властивості покриттів. Однією з важливих задач при розробці технології детонаційно-газового напилення є організація належного введення напилюваного порошку в детонаційну камеру згоряння, що впливає на взаємодію з оброблюваною деталлю [11]. Це включає величину одиничних доз порошку, розташування його в стволе, дистанція напилення. У першій серії дослідів навішування порошку вводилися в ствол на певній відстані від дульного зрізу ствола S . Використовували ствол довжиною $l = 1800$ мм з внутрішнім діаметром 20 мм, який повністю заповнювався сумішшю ацетилену з киснем у співвідношенні 1: 1,1. Покриття наносили також на нерухомі сталеві зразки. Змінювали також дистанцію напилення. На рис. 1 представлені результати виміру мікротвердості та пористості покриттів, одержуваних при різних технологічних параметрах.

Для покриттів з механічної суміші дрібнодисперсного порошку WC-Co з розміром частинок 2...5 мкм, що вводиться в ствол компактними навішеннями, характерне підвищення однорідності властивостей зі збільшенням дистанції напилювання (рис. 1, а, б). Спостерігаються істотні коливання мікротвердості покриттів при зменшенні середнього значення з ростом глибини завантаження початкового порошку. Різке падіння мікротвердості

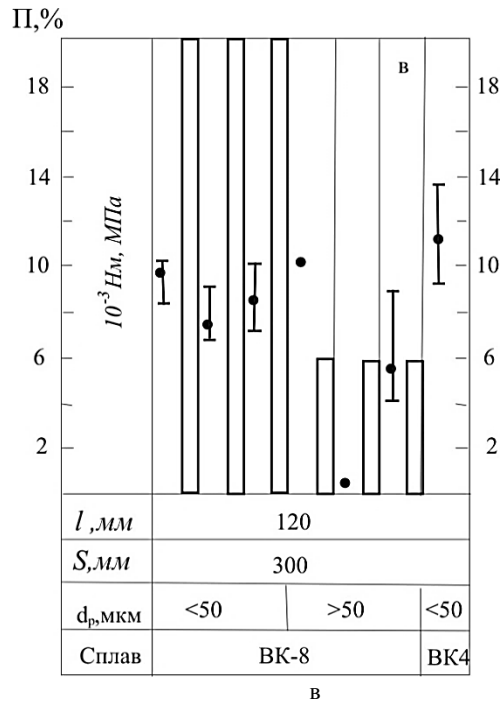
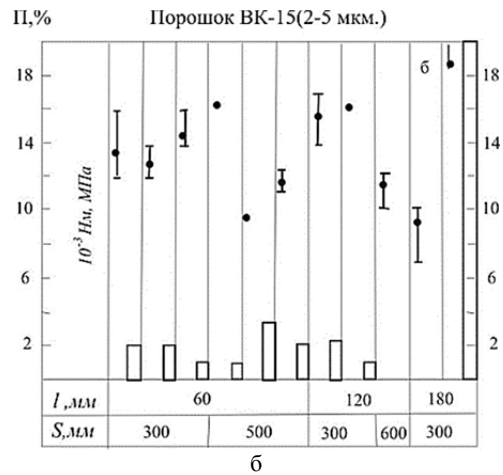
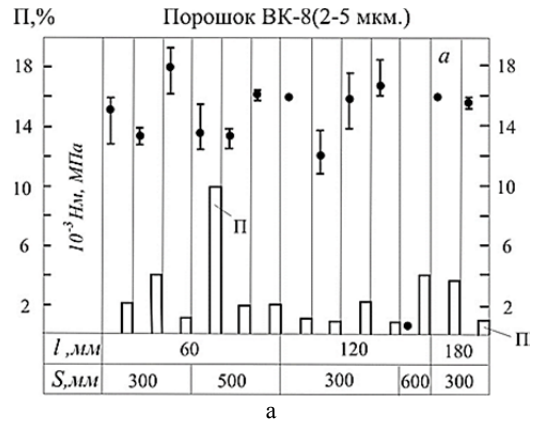


Рис. 1, а. Мікротвердість і пористість детонаційно-газових покриттів з порошків: ВК8, 2...5 мкм (а); ВК15, 2...5 мкм (б); ВК8, ВК4, 50 мкм; ВСНГН85, $d_p < 50$ мкм (г); ВСНГН85, $d_p > 50$ мкм (д); КХН15 (е); КХН20, КХН30 (і). Довжина ствола 1800 мм, діаметр 20 мм; l - дистанція напилювання; S - відстань між вихідним торцем ствола і точкою вводу порошку

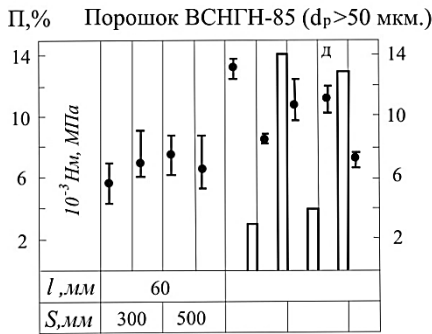
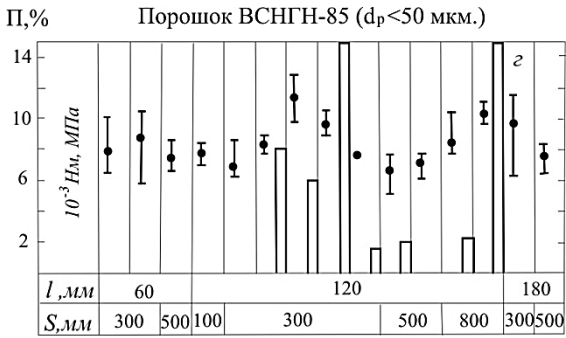


Рис. 1, г, д

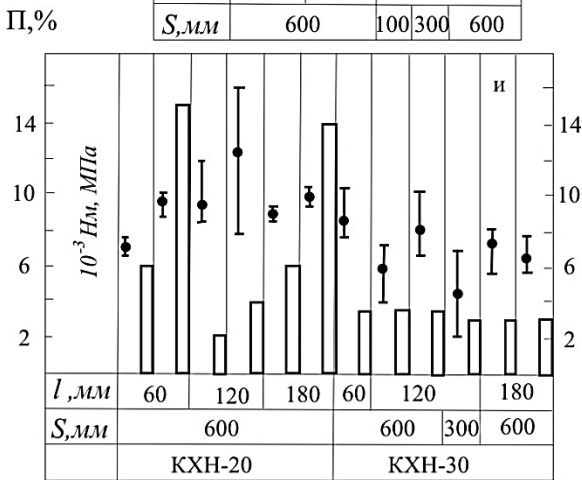
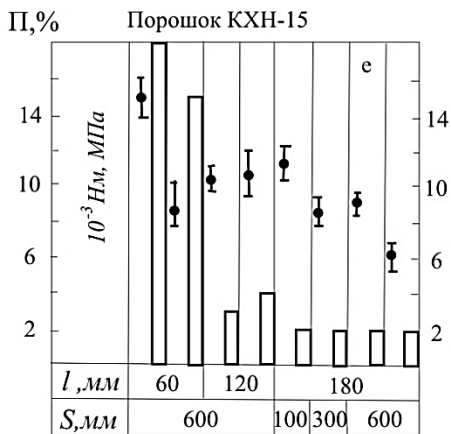


Рис. 1, е, и

при $S = 600 \text{ мм}$, $l = 120 \text{ мм}$ може бути пов'язано з розкладанням ВС.

Покриття з порошків, отриманих дробленням спечених твердих сплавів ВК8 і ВК4, мають більш

високу пористість і знижену мікротвердість (мал.1, в), тобто істотно нижче в порівнянні з напиленням мелкодисперсними порошками. Це може бути пов'язано з труднощами зважування зі стінки ствола окремих частинок порошку з навішування і формування зваженого в продуктах газової детонації порошкової хмарки. Підйом частинок порошку вимагає більш значного часу, що цілком можна пояснити з позицій механіки аерозолів. Затримка в підйомі частинок порошку звужує можливості ефективного використання енергії імпульсного потоку продуктів газової детонації. Найбільш високоенергетична головна частина імпульсного потоку закінчується в атмосферу вхолосту, а в міру підйому зі стінки столу частки порошку захоплюються хвостовою частиною потоку зі зниженими значеннями швидкості і температури газу. Частинки порошку соударяються з поверхнею деталі з меншими значеннями швидкості і температури частинок, хоча при цьому карбід волфраму піддається в меншій мірі розкладання. Більш низькі значення мікротвердості можуть бути пояснені зниженою когезійною міцністю внаслідок зменшення термічного і механічного активування в процесі формування одержуваних покриттів. Більш висока пористість покриттів також пов'язана зі зменшенням ступеня деформування частинок внаслідок зниження пластичності і швидкості зіткнення.

Для покриттів, одержуваних з конгломерірованого порошку ВСНГН-85, характерна більш висока однорідність мікротвердості і істотний розкид пористості (рис. 1, г, д). Ці порошки створені спеціально для процесів газотермічного напилення. Причому істотне підвищення пористості спостерігається при високих значеннях дистанції напилювання і відповідним зниженням швидкості і температури частинок.

Для покриттів з механічної суміші порошків карбиду хрому і 15% нікелю (КХН15) спостерігається зниження мікротвердості зі збільшенням дистанції напилювання (мал.1, е). При цьому пористість покриттів також знижується. Аналогічні, але менш чітко виражені закономірності з'являються і для покриттів з порошків КХН20 і КХН30 (рис.1, і).

Наступна серія дослідів проведена при різних способах введення навішування порошку в детонаційну камеру згоряння: I - компактного навішування на стінці ствола; II - компактного навішування на тонкій полиці в центрі ствола; III - локальне розпорошення навішування порошку по осі ствола. Результати вимірювання мікротвердості для різних порошків при різних положеннях точки введення порошку і дистанції напилення наведені на рис. 2. З різних способів введення порошку (100 мг) в ствол найбільш високі значення мікротвердості одержуваних покриттів досягаються при вихідному розміщенні навесок в центрі ствола (рис. 2). Тут також спостерігаються зміни в умовах формування порошкового хмарки в столі і його взаємодії з імпульсним потоком гарячих продуктів газової детонації. При різних умовах напилення змінюється температура і

швидкість часток порошку при зіткненні з поверхнею деталі, а також час їх попереднього нагріву і прискорення. Частинки піддаються різного ступеня перетворень в потоці і при зіткненні в процесі формування покриттів. Змінюється також когезійна міцність покриттів. Межі розділу між окремими частинками впливають на механічні властивості покриття, в тому числі і їх твердість. Таким чином, умови формування імпульсного гетерогенного потоку і зміна часу перебування частинок в потоці в цій серії експериментів також впливають на властивості одержуваних покриттів.

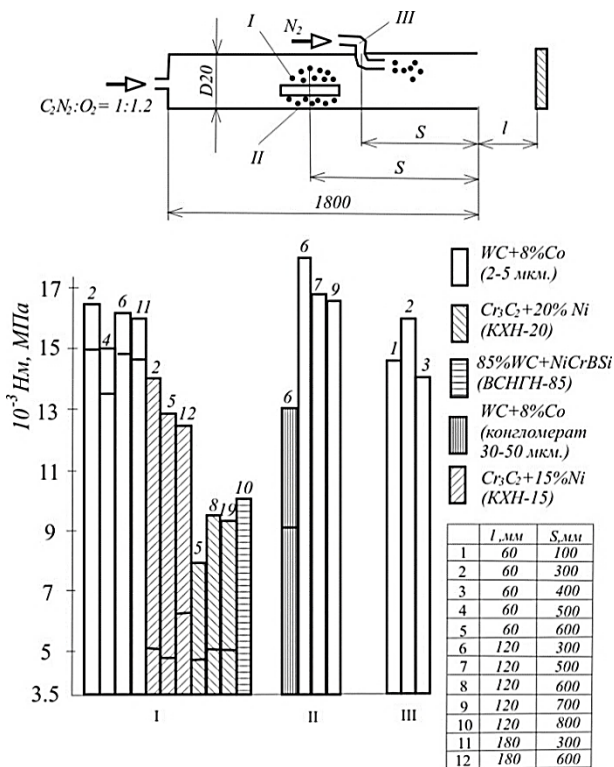


Рис. 2. Мікротвердість покриттів при різних способах введення порошку в ствол

При автоматичній подачі порошку в середню частину ствола і розпиленні його азотом в напрямку відкритого торця з збільшенням дистанції напылювання мікротвердість покриттів з порошку ВК8 зменшується майже лінійно (рис. 3). Покриття мають високу щільність (рис. 4). Зміст вуглецю в покриттях з дрібнодисперсного порошку ВК8 знижується до 60-80% від стехіометричного складу. Вміст кобальту в покритті відповідає вихідному порошку. На мікрофотографії поперечного шліфа покриття (рис. 5,а) помітні включення, що нагадують η₁-фазу (Co₃W₃C), що мають неправильну форму і щодо одно-мірно розподілену в покритті. В шарі покриття зберігаються зерна фази WC (рис. 5, б). При тривалому травленні ця фаза повністю витравлюється, причому виявляється характерне розподіл фази η₁ у вигляді мережив (рис. 5, в). Спостерігається істотний розкид мікротвердості в шарі покриття від 8000 до 16000 МПа (рис. 6). Це пов'язано з гетерогенним

характером структури покриття і нерівномірним розподілом фазових складових.

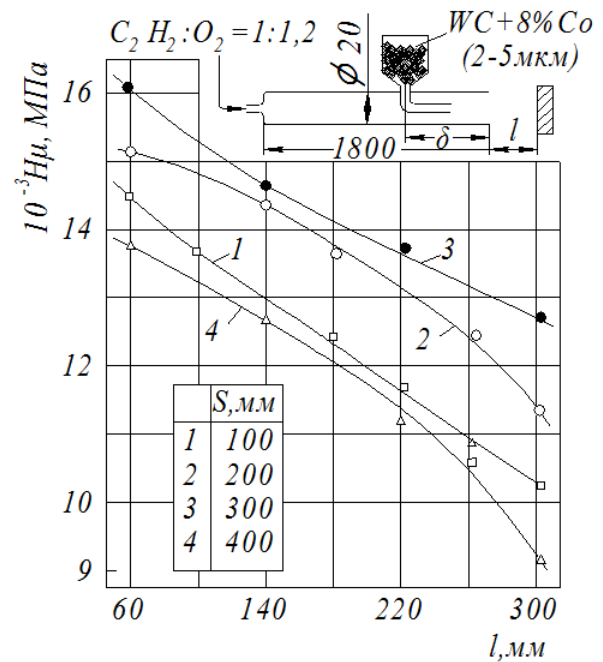


Рис. 3. Вплив дистанції напылювання на мікротвердість покриттів з порошку ВК8

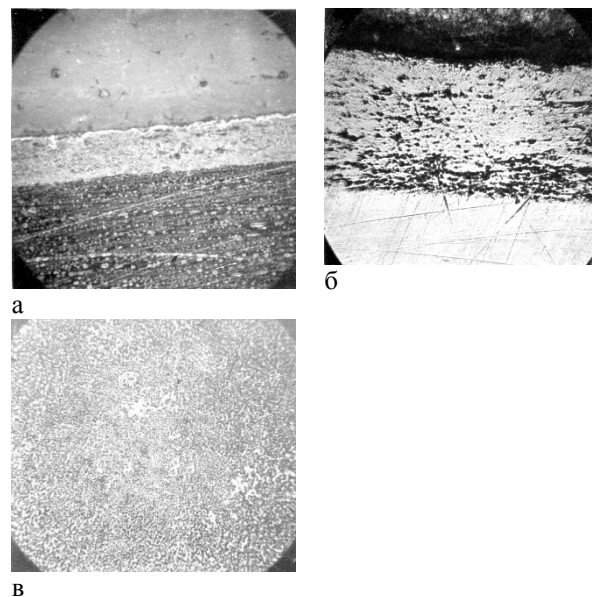


Рис. 4. Мікроструктура покриттів з порошку ВК8 на сталевий основі: а – ×130, б – ×500, в – ×500 (поздовжній шліф)

Висновки. 1. Формування структури і властивостей детонаційно-газових покриттів визначається характером і інтенсивністю протікання процесів фізико-хімічних перетворень в частинках порошку і їх взаємодії з навколишнім середовищем на всіх стадіях технологічного процесу, включаючи виготовлення і підготовку порошку, а також формування міжчасткових зв'язків. При розробці технологічних процесів необхідно враховувати і забезпечити опти-

мальні умови протікання провідних перетворень і явищ, що роблять вирішальний вплив на структуру і властивості нанесених покриттів. Для цього можуть бути використані регулювання складу горючої суміші, геометрії і розмірів ствола, умов введення порошку в ствол, одиничної дози порошку, дистанції напылення, циклограми робочого циклу і інші технологічні прийоми.



Рис. 5. Мікроструктура покриттів з порошку ВК8 на сплаві титану: а - $\times 500$, $\times 800$, $\times 1500$

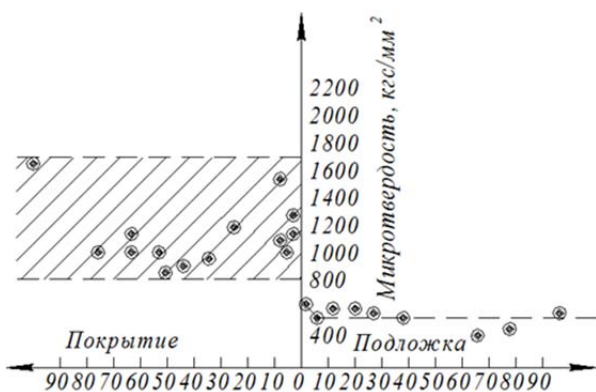


Рис. 6. Мікротвердість в поперечному перерізі зразка з титанового сплаву ВТ3-1 з покриттям з порошку ВК8

2. При розробці технології та обладнання для детонаційно-газового напылення покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому особливу увагу слід приділяти формуванню локального порошкового хмарки в детонаційній камері згоряння, а також його розташуванню в камері з урахуванням дистанції напылювання.

3. Детонаційно-газовим напыленням можна отримувати якісні покриття з дрібнодисперсних порошків карбід вольфраму - кобальт, але необхідна розробка спеціалізованих пристроїв для дозування і локального введення тонкодисперсних порошків в детонаційну камеру згоряння.

4. При напыленні порошками з розміром частинок в десятки мікрметрів слід забезпечувати їх попереднє розсіювання в свіжій горючій суміші.

Література

1. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением // Физика и химия обработки материалов, 1977. № 5. – С. 13 – 24.
2. Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития // Вісник Східноукр. нац. університету імені В.Даля, №2 (226), 2016, с. 5-19.
3. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. - М.: Металлургия, 1976. - 528 с.
4. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения (справочник). М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
5. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наукова думка, 2007. – 558 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардаговская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
7. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. Для ВУЗов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 782 с.
8. Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-е, 1985. – 199 с.
9. Карбидные порошки для газотермического напыления. Компания FST (FLAME SPRAY TECHNOLOGIES), Нидерланды. <http://www.flamespraytech.ru/materials/powders/carbides>
10. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия - Киев: Техніка, 1986. - 223 с.
11. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов, О.В. Гусев, Б.Л. Рябошапка // Физика горения и взрыва (СО АН СССР), 1975. № 1. – С. 88-95.

References

1. Shorshorov M.Kh., Kudinov V.V., Kharlamov Yu.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya nanoseniya pokrytiy raspyleniem // Fizika i khimiya obrabotki materialov, 1977. № 5. – S. 13 – 24.
2. Kharlamov Yu.A., Polonskiy L.G. Gazotermicheskoe napylenie. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya // Visnik Skhidnoukr. nats. univ-sitetu imeni V.Dalya, №2 (226), 2016, s. 5-19.

3. Tret'yakov V.I. Osnovy metallovedeniya i tekhnologii proizvodstva spechennykh tverdykh splavov. - M.: Metallurgiya, 1976. - 528 s.
4. Samsonov G.V., Vinitskiy I.M. Tugoplavkie soedineniya (spravochnik). M.: Metallurgiya, 1976. - 560 s.
5. Īzheneriya poverkhni / K.A. Yushchenko, Yu.S. Borisov, V.D. Kuznetsov, V.M. Korzh. - Kiiv: Naukova dumka, 2007. - 558 s.
6. Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov / Yu.S. Borisov, Yu.A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.P. Ardatovskaya. - K.: Nauk. dumka, 1987. - 544 s.
7. Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya: ucheb. Dlya VUZov [Tekst] / V.N. Antsiferov, G.V. Bobrov, L.K. Druzhinin i dr.; pod red. B.S. Mitina. - M.: Metallurgiya, 1987. - 782 s.
8. Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov [Tekst] / A.Ya. Kulik, Yu.S. Borisov, A.S. Mnukhin, M.D. Nikitin. - L.: Mashinostroenie, Leningrad. otd-e, 1985. - 199 s.
9. Karbidnye poroshki dlya gazotermicheskogo napyleniya. Kompaniya FST (FLAME SPRAY TECHNOLOGIES), Niderlandy. <http://www.flamespraytech.ru/materials/powders/carbides>
10. Borisov Yu.S., Borisova A.L. Plazmennye poroshkovye pokrytiya - Kiev: Tekhnika, 1986. - 223 s.
11. Primenenie detonatsii v gazakh dlya naneseniya pokrytiy / Yu.A. Kharlamov, M.Kh. Shorshorov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev, B.L. Ryaboshapko // Fizika goreniya i vzryva (SO AN SSSR), 1975. № 1. - S.88-95.

Харламов Ю.А. Влияние условий детонационно-газового напыления на свойства покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома

Детонационно-газовое напыление относится к одним из перспективных способов получения покрытий в высокотехнологичных отраслях. Свойства карбидов вольфрама и хрома обуславливают их применение для получения защитных и функцио-

нальных покрытий. Рассмотрены особенности получения газотермических покрытий на основе этих карбидов, в том числе благоприятные значения параметров трудности плавления и коэффициентов аккумуляции тепла. Изучено влияние видов порошков по способам их получения, составу, размерам, ввода в детонационную камеру сгорания, дистанции напыления на структуру, микротвердость и пористость покрытий. Показана возможность получения качественных покрытий из мелкодисперсных порошков.

Ключевые слова: детонационно-газовое напыление; дистанция напыления; камера сгорания; микротвердость; покрытие; пористость; порошок; карбиды вольфрама и хрома

Kharlamov Y. Influence of the conditions of D-Gun spraying on the properties of coatings on the basis of tungsten and chrome carbides

Detonation-gas spraying is one of the promising methods for producing coatings in high-tech industries. The properties of tungsten and chromium carbides determine their use for the production of protective and functional coatings. The features of gas-thermal coatings based on these carbides are considered, including the favorable values of melting difficulty parameters and heat accumulation factors. The effect of powder types was studied according to the methods of their preparation, composition, size, input into the detonation combustion chamber, spraying distance on the structure, microhardness and porosity of coatings. The possibility of obtaining high-quality coatings from fine powders is shown.

Key words: detonation gas spraying; spraying distance; the combustion chamber; microhardness; coating; porosity; powder; tungsten and chromium carbides

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 07.02.2019.

УДК 621. 793

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМ НАПИЛЕННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ВОЛЬФРАМУ ТА ХРОМУ

Харламов Ю.О.

PHYSICAL AND CHEMICAL TRANSFORMATIONS AT THERMAL SPRAYED COMPOSITION COATINGS BASED ON TUNGSTEN CHROME CARBIDES

Kharlamov Y.

Формування структури і властивостей газотермічних покриттів в великій мірі визначається інтенсивністю протікання перетворень в напилюваних матеріалах на всіх стадіях отримання покриття. Проаналізовано можливість протікання перетворень в порошках карбідів вольфраму і хрому при різних способах газотермічного напилення і одержувані структура і властивості покриттів. Вивчено вплив умов детонаційному-газового напилення - дистанції напилювання, витрати газів, виду порошку і ін. - на фазовий склад і властивості покриттів. Розглянуто основні фізико-хімічні перетворення, які супроводжують детонаційно - газове нанесення покриттів з порошків сплаву WC - C: окислення і відновлення карбіду вольфраму в високотемпературній кисневмісній середовищі, взаємодія компонентів композиційного покриття.

Ключові слова: газотермічні покриття; карбід вольфраму; карбід хрому; мікротвердість; напилення; порошок; твердість; фазовий склад

1. **Вступ.** Газотермічне напилення покриттів (ГТНП) охоплює групу технологій, що забезпечують нагрів і прискорення дисперсних частинок матеріалу високотемпературними потоками газів і подальше зіткнення частинок з поверхнею напилюваної деталі. Істотною перевагою методів газотермічного напилення є можливість управління складом, структурою і, відповідно, властивостями одержуваних матеріалів і покриттів, в тому числі за рахунок застосування різних порошкових композицій різноманітного складу [1-3]. Однак технологічні системи ГТНП є досить складними, процес отримання покриттів супроводжується різноманітними впливами на частки вихідного матеріалу покриття як в результаті взаємодії частинок з навколишнім газовим середовищем, процесів взаємодії компонентів композиційних порошків при нагріванні, а також при взаємодії частинок з поверхнею деталі і між собою в покритті і наступному охолодженні останнього. Тому отримання покриттів з високими експлуатацій-

ними властивостями вимагає розуміння процесів перетворень з матеріалом, який напилюється, при газотермічному напиленні. В якості основного компонента багатьох газотермічних покриттів використовують карбіди вольфраму і хрому. Закономірності та тенденції зміни структури покриттів складу WC-Co та ін. в залежності від комплексу технологічних параметрів ГТНП вивчені недостатньо. Під дією високих температур, окислювального середовища і ударної взаємодії частинок WC з поверхнею деталі здійснюється перехід $WC \rightarrow W_2C \rightarrow W$. У покриттях виявляються також інтерметаліди і подвійні карбіди вольфраму [4,5]. Метою даної статті є порівняльний аналіз можливих перетворень в покриттях на основі карбідів вольфраму і хрому при різних методах ГТНП, а також вивчення перетворень, що протікають при детонаційному-газовому напиленні таких матеріалів.

2. **Порівняння можливостей методів газотермічного напилення.** До найбільш поширених методів ГТНП відносяться газополуменеве, полум'яне і детонаційному-газове напилення покриттів з порошкових матеріалів.

Газополуменеве напилення. Як високотемпературний джерело тепла використовується ацетиленокисневе полум'я (або газів - заміників ацетилену). Перевагами методу є висока продуктивність, локальність обробки, незначний вплив на підкладку, можливість нанесення покриттів на вироби великих розмірів і ін. Застосування цих технологій для напилення на основі карбідів вольфраму і хрому обмежено через низьку якість одержуваних покриттів.

Плазмове напилення дозволяє наносити покриття практично з будь-яких видів матеріалів, хоча для оптимізації процесу напилення порошків з різною температурою плавлення може знадобитися деяка модифікація конструкції плазмотрона. При плазмовому напиленні відбувається зневуглещування

монокарбіду вольфраму (WC) до пів-карбіду вольфраму (W_2C), а також металевого вольфраму [7]. Присутність кисню в плазмовому струмені сприяє зародженню оксикарбідів в значній кількості, що небажано для зносостійкості покриттів. Крім того, висока пористість і більш низька твердість є основними недоліками плазмових покриттів для деяких застосувань. Високошвидкісні процеси ГТНП, які засновані на використанні механічної активації, зводять до мінімуму розкладання фази карбіду через більш низької ентальпії тепла і більш коротку тривалість процесу формування покриття. Більш висока швидкість частинок забезпечують одержувані покриттям ряд переваг, таких як більш низька пористість, більш висока міцність зчеплення і твердість.

Серед карбідів WC має найкращу змочуваність металами, що використовуються як зв'язок. Це, поряд з відносно високою в'язкістю, робить WC найбільш широко використовуваним карбідом для спечених твердих сплавів. Кобальт є найбільш часто використовуваних сполучною, тому що він володіє відмінними змочувальними і адгезійними властивостями. WC не має стабільної розплавленої фази, але легко перетворюється в інші фази, коли вміст вуглецю нестехіометричен [8]. Тому WC є нетехнологічним матеріалом для обробки в умовах високих температур, що призводять до окислення / знеуглецювання при газотермічному напиленні, особливо при плазмовому [8]. В [8] наведено огляд робіт, виконаних до 1998 року, з вивчення мікроструктури і фазового складу WC-Co (12 і 17 мас.%). Розглянуто фазові зміни, що відбуваються під час напилення порошків, отриманих литтям з подальшим подрібненням, спіканням-подрібненням і конгломеруванням. Детально обговорено втрату WC під час напилення і одержуваний фазовий склад покриттів. Значення пористості покриттів варіюються від <0,2% до майже 20%. Пористість, як правило, вище для покриттів плазмового напилення, ніж для покриттів, одержуваних високошвидкісними методами напилення. Розмір зерен WC в литих-подрібнених порошках WC - 12% Co і отриманих з них покриттів більше, ніж в інших типах порошків. Однак литі-подрібнені порошки демонструють велику втрату WC під час напилення, ніж інші типи порошків. Порошок спеченого/подрібненого порошку, мабуть, найменш сприйнятливий до втрати WC під час напилення. При плазмовому напиленні порошок WC-Co має тенденцію піддаватися знеуглецюванню, окисленню, відновленню в результаті реакції з H_2 в плазмовому струмені і взаємодії між WC і Co, що призводить до утворення твердих і тендітних фаз, таких як W_2C , Co_3W_3C , Co_6W_6C , Co_2W_4C , $Co_3W_9C_4$ і навіть WO_3 і вольфраму [8]. Сполучна в газотермічних покриттях WC-Co часто є переважно аморфним через швидке затвердіння після розпилення [8].

Ступінь перетворення WC під час напилення залежить від вихідного порошку (розмір, морфологія, розмір карбіду), технології процесу напилення, вмісту кисню в напилювальному струмені, в тому чис-

лі того, що надходить від струменя холодного повітря і/або захопленого струменем гарячих газів, що збільшується з збільшенням дистанції напилювання, і параметрів напилення, оптимальні з яких призводять до меншої температури (близької до температури плавлення з) і більш високій швидкості. Наприклад, при порівнянні одного і того ж порошку WC-12 мас.% Co, що наноситься методами високошвидкісного газополуменевого напилення: кисневим (HVOF) і повітряним (HVAF), в покриттях HVOF було виявлено значну кількість W_2C , а також висока концентрація вольфраму в сполучній фазі [9]. При напиленні методом HVAF, де температура частинок нижче і швидкість вище, склад і мікроструктура покриттів не змінилися в порівнянні з порошком. Крім того, зносостійкість покриттів HVAF була вище, ніж у покриттів HVOF. Також чином, покриття WC-17 мас.% Co не були в основному залежні від зміни параметрів напилення, але більшою мірою залежали від складу порошку, діапазону розмірів часток і способу виготовлення [10].

Високошвидкісні методи напилення дозволяють значно розширити можливості традиційних способів ГТНП. Тут скорочується час перебування частинок в високотемпературному потоці і знижується їх перегрів і відповідно зменшується окислення частинок і, відповідно, вміст оксидів в покриттях. Збільшення кінетичної енергії частинок веде до збільшення щільності покриттів і міцності зчеплення покриттів з основою [5,6]. Характерними особливостями покриттів, отриманих високошвидкісним напиленням, є низька пористість (менше 1,5%) і збереження хімічного складу вихідного порошку, а також висока міцність зчеплення (більше 50...70 МПа). До високошвидкісним способам отримання покриттів відносяться методи детонаційно-газового, надзвукового повітряно-газового плазмового (СВГПН) і надзвукового газопламенного (HVOF) напилення. Швидкість частинок при напиленні становить: до 1000 м/с при детонаційно-газовому напиленні, 500 ... 1000 м/с при СВГПН і до 800 м/с при HVOF напиленні [6].

Висока зносостійкість газотермічних WC-Co-покриттів забезпечується поєднанням WC як твердої складової і кобальту як пластичної сполучною. У разі напилення WC-Co-покриттів високошвидкісні методи є кращими в порівнянні з іншими методами газотермічного напилення, так як великі швидкості і менші температури частинок порошку знижують ступінь розкладу WC в процесі напилення, запобігаючи тим самим зниження твердості і зносостійкості [3]. Для напилення використовуються WC-Co-порошки з вмістом 6...17% кобальту, отримані різними методами [4, 5]. Для підвищення стійкості WC-Co-покриттів до корозії порошки WC-Co легують хромом, так як Co-Cr матриця забезпечує більш високу стійкість до корозії в порівнянні з WC-Co-матеріалами. Зміст хрому в порошках 4...8% (WC-10Co-4Cr; WC-6Co-8Cr) [6]. Залежно від складу порошку, типу обладнання і режимів напилення

мікротвердість отриманих WC-Co-покриттів складає 6...12 МПа при детонаційно-газовому напиленні [6], 10...15 МПа при СВГПН і HVOF напиленні [6]. Пористість таких покриттів, отриманих високошвидкісними методами напилення, зазвичай не перевищує 1,5%. У структурі покриття, отриманого детонаційно-газовим методом, є оксидні прошарки (близько 5%).

Мікротвердість покриттів WC-9Co-9Cr, отриманих методом HVOF і СВГПН, становить 11,0 ... 11,7 МПа; мікротвердість детонаційного покриття 8,5 ГПа. Знижена (приблизно на 3 ГПа) мікротвердість детонаційного покриття і наявність оксидних прошарків в мікроструктурі пов'язані із застосуванням при напиленні окислювального середовища продуктів детонації киснево-пропан-бутанової суміші, що веде до розвитку процесів окислення напилюваного матеріалу і як результат часткової втрати вуглецю і окислення матеріалу матриці [6].

3. Дослідження перетворень при детонаційно-газовому напиленні. Вивчали структуру та властивості композиційних покриттів на основі карбідів вольфраму і хрому. В якості вихідного застосували такі порошки: 1. механічні стандартні суміші порошків WC-8Co (BK8); 2. конгломеріровані порошки сплаву WC-15% сплаву NiCrSiB (ВСНГН -85); 3. конгломеріровані порошки сплаву WC-25Co (BK25); 4. конгломеріровані порошки сплаву Cr_xC_y - Ni (КХН15С); 5. механічні суміші порошків карбідів хрому і нікелю типу КХН.

Методом локального рентгеноспектрального мікроаналізу вивчений хімічний склад детонаційно-газових покриттів з стандартного порошку BK8 в залежності від дистанції напилення (табл. 1). Зміна змісту вуглецю в покриттях може бути пов'язано як з дисоціацією, так і взаємодією WC з киснем і азотом, присутніми в високотемпературній струмені. Монокарбід WC плавиться з розкладанням при 2600 °С. Півкарбід W₂C термічно стійкий до температури 2750 °С, тобто практично до температури плавлення (2730 ± 15 °С) [11].

Таблиця 1

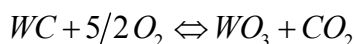
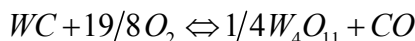
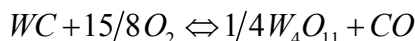
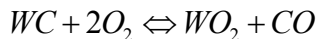
Хімічний склад детонаційно-газових покриттів з порошку BK8 (в мас.%)

Елемент	Дистанція напилення, мм		
	50	100	150
Co	9,3; 9,06; 9,22	9,05; 11,82	9,55
C	3,05; 5,72; 5,98	2,5; 2,59	3,42; 3,37
W	87,65; 85,22; 84,8	88,44; 85,59	87,03; 86,71

Вивчено вплив дистанції напилювання, витрати робочих газів, порошку і транспортувального газу на фазовий склад покриттів з порошку BK8 (табл. 2 і 3, рис. 1). При витраті ацетилену 179 см³/цикл (γ = O₂/C₂H₂ = 1,07) покриття містять W, W₂C, WC, Co₇W₆ (мал. 1, б). При витраті ацетилену 183

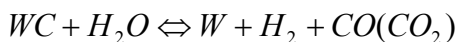
см³/цикл (γ = 1,04) покриття складаються з W₂C, Co₃W₉C₄, Co₃W₃C, WC (рис. 1, в).

При надлишку в газовій фазі кисню термодинамічно можливі наступні реакції його взаємодії з WC [12]



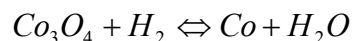
Реакції взаємодії, що протікають з утворенням CO₂, термодинамічно більш вірогідні, ніж аналогічні реакції з утворенням CO. Найбільш імовірною є остання реакція. Тонкий порошок WC починає швидко окислятися при 500-520 °С, полукарбід W₂C при цій же температурі окислюється до WO₃ [13].

При температурі понад 750 °С відбувається зневуглецювання карбіду вольфраму [14]



За збільшенням в навколишньому газовому середовищі вмісту парів води втрати вуглецю різко зростають.

Деяка частина зерен кобальту вихідного порошку знаходиться в окисленому стані. Оксиди кобальту можуть повністю відновлюватися воднем або вуглецем. При температурах вище 190 °С можлива реакція



Таблиця 2

Режими напилювання покриттів з порошку BK8

N, п/п	Q _{C₂H₂} , см ³ /цикл	l, мм	n	t _c , мм	t _s , мкм
1	200	120	30	0.5	16.7
2	183	120	80	0.56	7
3	179	120	50	0.42	8.4
4	163	150	80	1.04	13
5	179	150	50	0.71	14.2
6	183	150	30	0.41	13.7
7	183	180	30	0.33	11
8	200	180	50	0.31	6.2
9	163	180	50	0.34	6.8

Примітка: Q_{C₂H₂} – витрати ацетилену за одиничний цикл; l – дистанція напилення; n – кількість одиничних циклів напилення; t_c – загальна товщина плями напилення; t_s – товщина одиничного плями напилення.

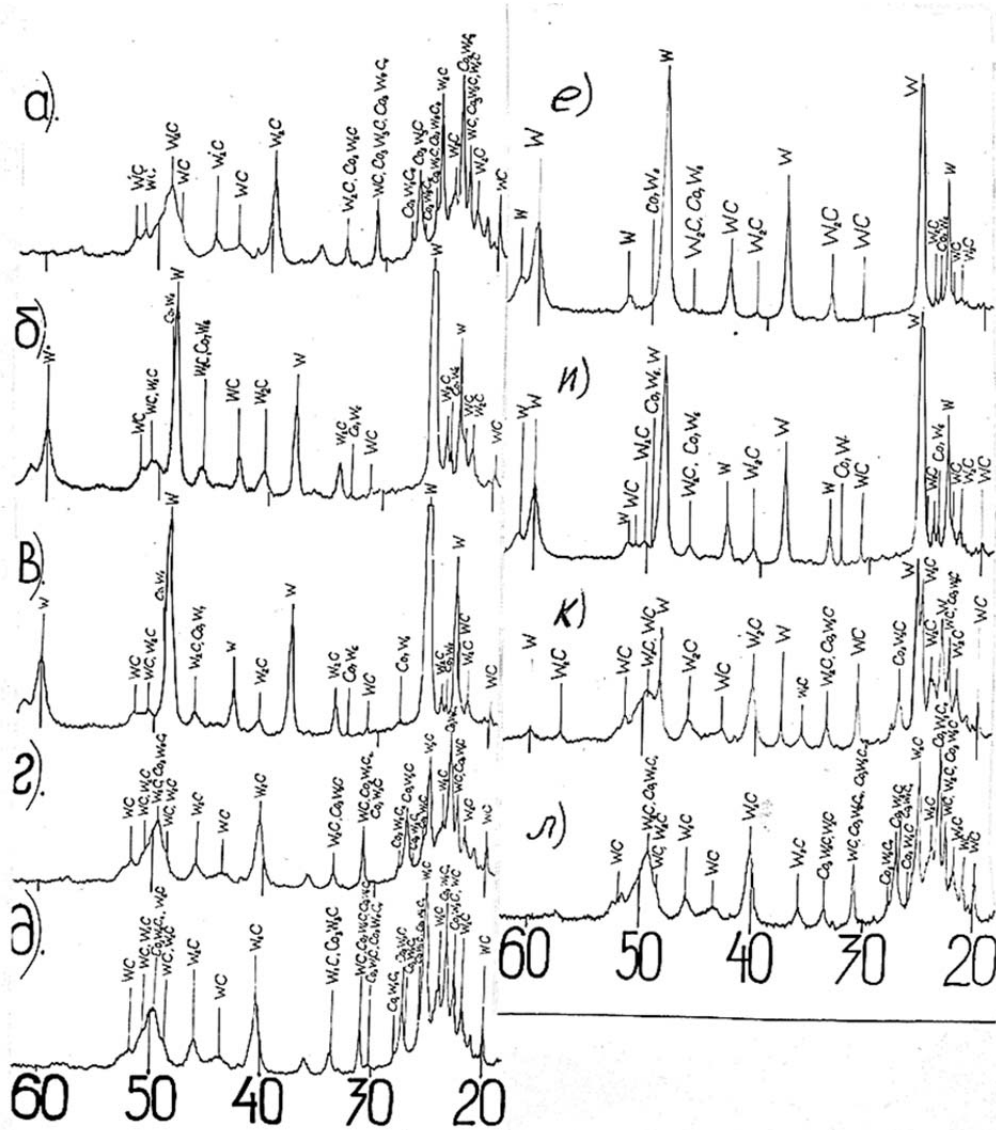
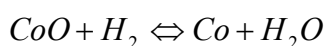


Рис.1. Рентгенограми вихідного порошку ВК8 (а) і покриттів, одержуваних при витраті ацетилену, см³/цикл: 179 (б), 183 (в, и, к, л), 200 (г), 218 (д), 163 (е). Витрата транспортувального газу, см³/цикл: 35 (б, в, г, д, е), 45 (и, к, л). Дистанція наплення 120 мм

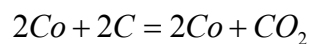
Таблиця 3
Фазовий склад і модуль пружності детонаційно-газових покриттів з порошку ВК8 при різних режимах наплення

N, п/п	Фази	E, МН/м ²
1	W, W ₂ C, WC, Co ₃ W ₃ C	1,99·10 ⁵
2	W, W ₂ C, Co ₃ W ₃ C, WC	3,0·10 ⁵
3	W, W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	3,2·10 ⁵
4	W, W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	2,3·10 ⁵
5	W, WC, Co ₇ W ₆	3,4·10 ⁵
6	W, W ₂ C, WC, Co ₃ W ₃ C	3,04·10 ⁵
7	-	2,3·10 ⁵
8	W ₂ C, Co ₃ W ₉ C ₄ , Co ₃ W ₃ C	2,33·10 ⁵
9	W ₂ C, WC, Co ₇ W ₆	2,6·10 ⁵

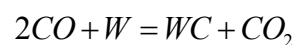
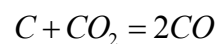
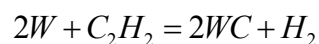
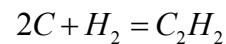
В інтервалі температур 200-400°С [14]

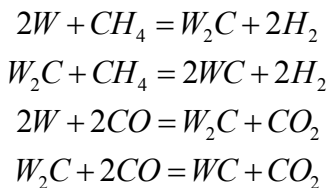


Якщо при вигоранні горючої суміші утворюється сажа (вільний вуглець), то за умови контакту її з частинками окисленого кобальту при температурах понад 500°С можлива реакція [14]



Процес науглецювання вольфраму здійснюється, в основному, через що містить вуглець газове середовище. Реакції при карбідизації можна представити наступними рівняннями

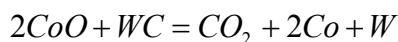




Утворений на поверхні частинки W дифузний шар складається з двох фаз - WC і W₂C, причому спочатку на поверхні утворюється фаза WC, з якої вуглець дифундує всередину з утворенням шару фази W₂C.

Подібний механізм проявляється і при зневуглецюванні частки карбіду вольфраму. Спочатку на поверхні утворюється фаза W₂C, в яку дифундує вуглець з ядра частки.

Якщо частинки WC і Co в процесі руху знаходяться в контакті, при температурі понад 530°C можлива реакція [14]



При температурі понад 850°C можлива реакція [14]



Можливо також розчинення вуглецю в кобальті при безпосереднім контакті частинок і через газову фазу при температурі понад 600°C, плавлення евтектики Co + WC при температурі 1300 – 1370°C.

Фізико-хімічні перетворення в частинках порошку обумовлюватися не тільки складом детонувальної суміші газів, а й рядом інших технологічних факторів (табл. 2, рис. 1). Перш за все слід враховувати особливості вихідного розміщення в стволі свіжого заряду - детонувальної суміші і порції порошка напилюваного матеріалу, що визначають характер динамічного, теплового та хімічного взаємодії частинок з продуктами згоряння, а потім і з поверхнею оброблюваної деталі. Про це свідчить істотна залежність твердості покриттів від витрати ацетилену (мал. 2). Для спечених твердих сплавів WC-8Co твердість HV при розмірі основної маси карбідних зерен 1-2 мкм становить 12160 МПа, а при розмірі основної маси карбідних зерен 2-5 мкм - 10300 МПа [15]. Полукарбід W₂C в порівнянні з монокарбідом WC має кілька підвищену твердість, але знижену міцність [13]. При зменшенні витрати ацетилену зменшується і загальна витрата горючої суміші за робочий цикл напилення, а також порошкова хмарка зміщується до закритого торця ствола. Це обумовлює більш тривале перебування порошку в гарячих продуктах детонації і інтенсифікацію перетворення WC → W₂C → W. Зниження твердості покриттів при збільшенні витрати ацетилену до 200...218 см³/цикл, пов'язано зі зростанням змісту в покриттях вільного вуглецю.

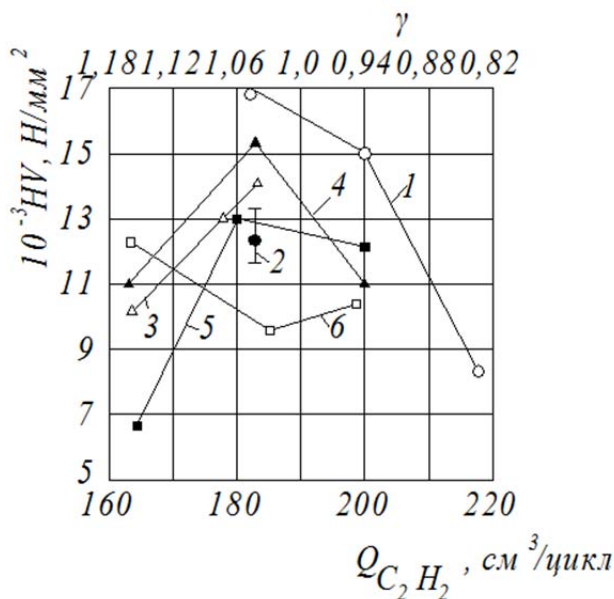


Рис. 2. Залежність твердості покриттів з порошку ВК8 від витрати ацетилену. Дистанція напилення, мм: 120 (1,2), 150 (3,4), 180 (5,6). Витрата транспортувального газу, см³/цикл: 35 (1,3,5), 45 (2,4,6)

Зі збільшенням маси одиначної дози порошку, що вводиться в ствол, а тим самим і товщини одиначного шару покриття, твердість покриттів знижується, в їх складі збільшується вміст вольфраму (рис. 3). На фазові перетворення в вихідному порошку ВК8 істотно впливає і вид транспортувального газу. При використанні повітря інтенсифікується процес перетворення WC → W₂C → W.

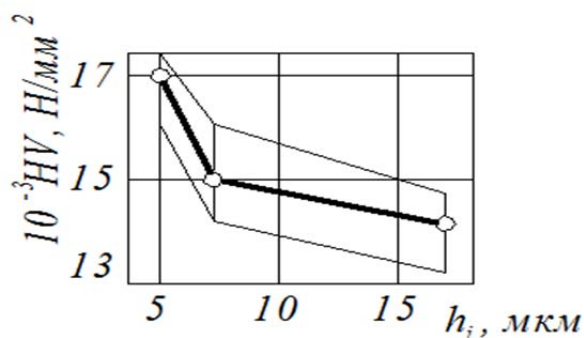


Рис. 3. Залежність твердості покриттів з порошку ВК8 від товщини одиначного шару

На рентгенограмі вихідного порошку є лінії монокарбіду WC, Co, а також сліди W₂C. При дистанції напилювання 150 мм основною фазою в покритті є полукарбід W₂C, значітельно менше міститься монокарбіду WC, а також незначітне кількість металевого вольфраму. Зі збільшенням дистанції напилення до 200 мм монокарбід вольфраму майже повністю перетворюється в металевий вольфрам і півкарбід W₂C. Останній міститься в меншій кількості. При дистанції напилення 250 мм основною фазою покриття також є металічеській вольфрам, в незначітних кількостях містяться карбіди W₂C і WC.

Збільшення вмісту W в покриттях в даному випадку можна пояснити підвищеним вмістом кисню в зоні розпилю порошку в стовбурі і протіканням реакції окислення. Оксиди вольфраму розкладаються при високій швидкості охолодження в контакт з основою.

Аналогічні фазові перетворення спостерігаються і при нанесенні покриттів з конгломерированного порошку BK25 ($WC-25Co$). У вихідному порошку основними фазами є монокарбід WC і Co , мається на незначній кількості півкарбід W_2C . На рентгенограмі покриття основними фазами є півкарбід W_2C , Co , в незначній кількості міститься монокарбід WC .

Близькі закономірності проявляються і при нанесенні покриттів з вихідного конгломерированного порошку ВСНГН -85 ($WC-15\%$ сплаву СНГН). На рентгенограмі вихідного порошку присутні тільки лінії монокарбиду WC . У покриттях появляются дві нові фази - півкарбід вольфраму W_2C і вольфрам W . С збільшенням дистанції напилювання відносна інтенсивність ліній W_2C і W зростає, тобто збільшується вміст цих фаз.

Зміна твердості та інших характеристик покриттів на основі карбиду хрому також пов'язано зі зміною інтенсивності переходу вищих карбідів в нижчі ($Cr_3C_2 \rightarrow Cr_7C_3, Cr_{23}C_6$), твердість яких значно нижче карбиду Cr_3C_2 . Проведено рентгеноструктурні дослідження фазового складу покриттів з конгломерированного порошку КХН15 (карбіди хрому -15% $NiCr$). У вихідному порошку містяться фази $Cr_3C_2, Cr_7C_3, Cr_{23}C_6, Ni, Cr$.

При дистанції напилювання 150 мм в покриттях є фази Cr_7C_3 (гексогональний), $Cr_3C_2, Cr_3Ni_2, NiCr$, в незначній кількості Cr_7C_3 (триклинний), Cr_2C, Cr_7C_3 (кубічний), $Cr_{23}C_6$. При збільшенні дистанції напилювання до 200-250 мм, тобто збільшенні часу перебування частинок порошку в високотемпературном потоці на рентгенограмах покриттів зникають лінії Cr_2C, Cr_3Ni_2, Cr_7C_3 (куб), $Cr_{23}C_6$, з'являються сліди оксиду Cr_2O_3 . Найбільш стабільний в термодинамічній відношенні вищий карбід хрому Cr_3C_2 [12]. За зменшення стабільності в середовищі кисню карбіди VI групи утворюють ряд $Cr_3C_2, WC, Mo_2C, Cr_7C_3, Cr_{23}C_6$.

Проведено дослідження мікроструктури покриття з порошку КХН15С і зони контакту покриття - основа методом мікрорентгеноспектрального мікроаналіза (рис 4). Покриття характеризується щільною структурою і досить рівномірним розподілом Cr і Ni в покритті. Спостерігається підвищена концентрація Fe і Cr в перехідній зоні між покриттям і основою. З кривих розподілу інтенсивності випромінювання слід, що товщина переходної зони становить ~ 5 мкм (мал. 5). Більш різкі коливання в розподілі нікелю по товщині покриття підтверджують дані про фазовий склад покриття.

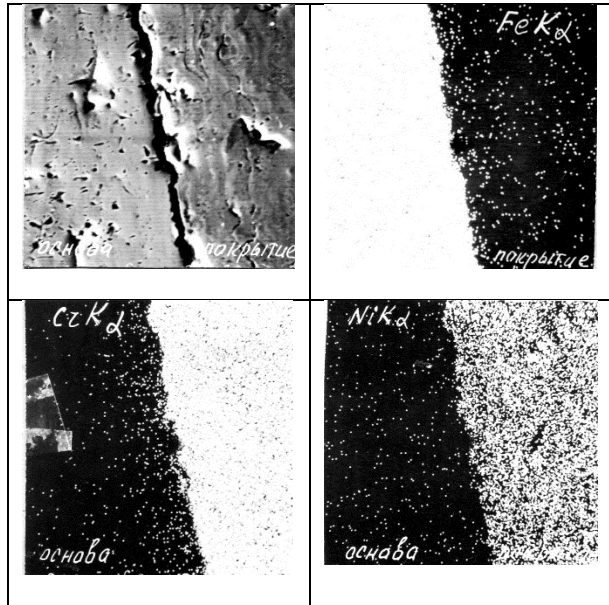


Рис. 4. Мікроструктура покриттів з порошку КХН-15С:
а – у вторинних електронах, $\times 500$;
б, в, г – в характерний рентгенівському випромінюванні: б – $Fe K\alpha$; в – $Cr K\alpha$; г – $Ni K\alpha$

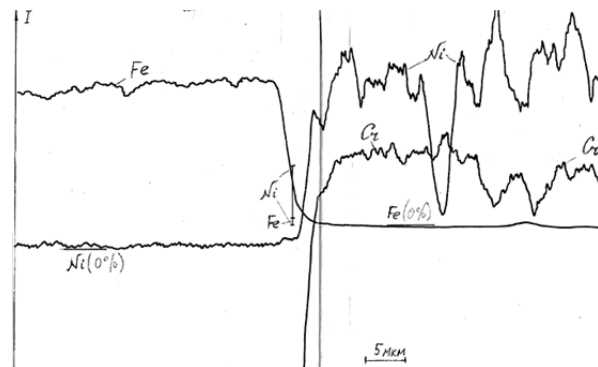


Рис. 5. Криві розподілу інтенсивності випромінювання нікелю, хрому та заліза в перерізі, перпендикулярному кордоні розділу основа (Cr_3) – покриття з порошку КХН-15С

Висновки. 1. Структура і властивості газотермічних покриттів визначаються характером і інтенсивністю протікання процесів фізико-хімічних перетворень в частинках порошку і їх взаємодії з робочим середовищем на всіх стадіях отримання покриттів, в тому числі виготовлення і підготовку порошку. При детонаційному-газовому напиленні для забезпечення оптимальних умов протікання провідних перетворень і явищ, що роблять вирішальний вплив на структуру і властивості нанесених покриттів, можуть бути використані регулювання складу горючої суміші, геометрії і розмірів ствола, умов введення порошку в ствол, одиничної дози порошку, дистанції напилювання, циклограми робочого циклу і інші технологічні прийоми.

2. Вивчено основні фізико-хімічні перетворення, супроводжуючі детонаційно-газове нанесення

покриттів з порошків сплаву WC - Co: окислення і відновлення карбіду вольфраму в високотемпературній кисневмісній середовищі, взаємодія компонентів композиційного покриття.

3. Загальний принцип розробки оптимальної операційної технології детонаційно-газового нанесення покриттів заключається в забезпеченні однорідних умов нагріву, складу окружающего газового середовища і однакового часу перебування частинок в напилувальном потоці.

4. Для отримання покриттів на основі карбідів перехідних металів з високою адгезійною і когезійною міцністю і сохрненні початкового фазового складу рекомендується забезпечити їх формування з твердих частинок, нагрітих до предплавильних температур, при швидкостях зіткнення з основою 300 ... 600 м/с і швидкостях охолодження одиничних шарів формованого покриття понад $5 \cdot 10^3$ К/с, що виключають розкладання карбідів.

Література

1. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учеб. для ВУЗов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – Под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
2. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением // Физика и химия обработки материалов, 1977. № 5. – С. 13 – 24.
3. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов, О.В. Гусев, Б.Л. Рябошапка // Физика горения и взрыва (СО АН СССР), 1975. № 1. – С.88-95.
4. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардатовская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
5. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления / Ю.С. Борисов, Е.А. Астахов, А.П. Мурашов и др. // Автоматическая сварка, 2015. № 10. – С.26-29.
6. Influence of process variables on the qualities of detonation gun sprayed WC–Co coatings / Hao Du, Weigang Hua, Jiangang Liu et al. // Materials Science and Engineering A, 2005, V. 408. P. 202–210.
7. de Villiers LHL (1998) Powder/processing/structure relationships in WC-Co thermal spray coatings: a review of the published literature. J Therm Spray Technol 7(3):357–373
8. Jacobs L, Hyland MM, De Bonte M (1998) Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF process. J Therm Spray Technol 7(2):213–218
9. de Villiers Lovelock HL, Richter PW, Benson JM, Young PM (1998) Parameter study of HP/HVOF deposited WC-Co coatings. J Therm Spray Technol 7(1):97–107
10. Панфилов С.А., Цветков Ю.В., Чижиков Д.М. О диссоциации карбида вольфрама в струе низкотемпературной плазмы // Изв. АН СССР. Металлы, 1967, N 3. - С.66-73.
11. Войтович Р.Ф. Тугоплавкие соединения. Термодинамические характеристики: Справочник. - К.: Наук. думка, 1971. - 219 с.
12. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.И. Карбиды вольфрама. - К.: Наук. думка, 1974. - 175 с.
13. Бабич М.М. Неоднородность твердых сплавов по содержанию углерода и ее устранение - К.: Наук. думка, 1975. - 175 с.
14. Третъяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных сплавов. - М.: Металлургия, 1976. - 528 с.

References

1. Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya: Ucheb. dlya VUZov [Tekst] / V.N. Antsiferov, G.V. Bobrov, L.K. Druzhinin i dr. – Pod red. B.S. Mitina. – М.: Metallurgiya, 1987. – 792 s.
2. Shorshorov M.Kh., Kudinov V.V., Kharlamov Yu.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya naneseniya pokrytyi raspyleniem // Fizika i khimiya obrabotki materialov, 1977. № 5. – S. 13 – 24.
3. Primenenie detonatsii v gazakh dlya naneseniya pokrytyi / Yu.A. Kharlamov, M.Kh. Shorshorov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev, B.L. Ryaboshapko // Fizika goreniya i vzryva (SO AN SSSR), 1975. № 1. – S.88-95.
4. Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov / Yu.S. Borisov, Yu.A. Kharlamov, S.L. Sidorenko, E.P. Ardatovskaya. – К.: Nauk. dumka, 1987. – 544 s.
5. Issledovanie struktury i svoystv gazotermicheskikh pokrytyi sistemy WC–Co–Cr, poluchennykh vysokoskorostnymi metodami napyleniya / Yu.S. Borisov, E.A. Astakhov, A.P. Murashov i dr. // Avtomaticheskaya svarka, 2015. № 10. – S.26-29.
6. Influence of process variables on the qualities of detonation gun sprayed WC–Co coatings / Hao Du, Weigang Hua, Jiangang Liu et al. // Materials Science and Engineering A, 2005, V. 408. P. 202–210.
7. de Villiers LHL (1998) Powder/processing/structure relationships in WC-Co thermal spray coatings: a review of the published literature. J Therm Spray Technol 7(3):357–373
8. Jacobs L, Hyland MM, De Bonte M (1998) Comparative study of WC-cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVOF process. J Therm Spray Technol 7(2):213–218
9. de Villiers Lovelock HL, Richter PW, Benson JM, Young PM (1998) Parameter study of HP/HVOF deposited WC-Co coatings. J Therm Spray Technol 7(1):97–107
10. Panfilov S.A., Tsvetkov Yu.V., Chizhikov D.M. O dissotsiatsii karbida vol'frama v strue nizkotemperaturnoy plazmy // Izv. AN SSSR. Metallurgiya, 1967, N 3. - S.66-73.
11. Voytovich R.F. Tugoplavkie soedineniya. Termodinamicheskie kharakteristiki: Spravochnik. - К.: Nauk. dumka, 1971. - 219 s.
12. Samsonov G.V., Vitryanyuk V.K., Chaplygin F.I. Karbidy vol'frama. - К.: Nauk. dumka, 1974. - 175 s.
13. Babich M.M. Neodnorodnost' tverdykh spлавov po soderzhaniiyu ugleroda i ee ustranenie - К.: Nauk. dumka, 1975. - 175 s.
14. Tret'yakov V.I. Osnovy metallovedeniya i tekhnologii proizvodstva spechennykh spлавov. - М.: Metallurgiya, 1976. - 528 s.

Харламов Ю.А. Физико-химические превращения при газотермическом напылении композиционных покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома

Формирование структуры и свойств газотермических покрытий в большой мере определяется интенсивностью протекания превращений в напыляемых материалах на всех стадиях получения покрытия. Проанализирована возможность протекания превращений в порошках карбидов вольфрама и хрома при различных способах газотермического напыления и получаемые структура и свойства покрытий. Изучено влияние условий детонационно-газового напыления – дистанции напыления, расхода газов, вида порошка и др. - на фазовый состав и свойства покрытий. Рассмотрены основные физико-химические превращения, сопровождающие детонационно-газовое нанесение покрытий из порошков сплава WC – C: окисление и восстановление карбида вольфрама в высокотемпературной кислородосодержащей среде, взаимодействие компонентов композиционного покрытия.

Ключевые слова: газотермические покрытия; карбид вольфрама; карбид хрома; микротвердость; напыление; порошок; твердость; фазовый состав

Kharlamov Y. Physical and chemical transformations at thermal spraying of composition coatings based on tungsten carbide and chrome carbide

The formation of the structure and properties of thermal spray coatings is largely determined by the intensity of the transformations in the sprayed materials at all stages of the coating production. The possibility of the occurrence of transformations in powders of tungsten carbide and chromium carbides with various methods of thermal spray coating and the resulting structure and properties of coatings are analyzed. The influence of the conditions of detonation gas spraying – the spraying distance, gas flow rate, type of powder, etc. – on the phase composition and properties of coatings was studied. The main physical and chemical transformations accompanying the detonation - gas coating of powders of the alloy WC-Co are considered: oxidation and reduction of tungsten carbide in a high temperature oxygen - containing medium, interaction of the components of the composite coating.

Keywords: gas-thermal coatings; tungsten carbide; chromium carbide; microhardness; spraying; powder; hardness; phase composition

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 07.02.2019.

УДК 621.891

ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ WC-CO**Харламов Ю.О., Міцик А.В., Романченко О.В.****TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF WC-Co COATINGS****Kharlamov Y., Mitsyk A., Romanchenko A.**

Наведено результати експериментального дослідження триботехнічних властивостей детонаційно-газових покриттів з порошку сплаву ВК8. Покриття отримували напиленням стандартного порошку WC-8 % Co. Основні дослідження проведені в умовах торцевого тертя циліндричних зразків без змащення (сухого тертя). Для проведення випробувань при торцевому терті циліндричних зразків розроблено пристрій до металорізальних верстатів. Покриття наносилися на сталеві зразки безпосередньо після токарної обробки, струминно-абразивна підготовка поверхонь до напилення не проводилася. Вивчено вплив швидкості ковзання до 3 м/с на коефіцієнт тертя, швидкість зношування та температуру пар тертя: покриття-нормалізована сталь 45; покриття-загартована сталь 45 і покриття-покриття. Для всіх пар тертя характерно зменшення коефіцієнта тертя та збільшення температури в зоні тертя з ростом швидкості ковзання. Причому в діапазоні швидкостей ковзання від 0,104 до 0,6 м/с спостерігається більш інтенсивне зниження коефіцієнта тертя, при подальшому підвищенні швидкості ковзання темп його зниження зменшується та при 3,14 м/с досягає 0,145. У дослідженому діапазоні швидкостей ковзання при використанні в якості контртіла сталевих зразків коефіцієнт тертя має децю менші величини.

Ключові слова: детонаційно-газове напилення; знос; інтенсивність зношування; коефіцієнт тертя; швидкість ковзання; сплав ВК8; сухе тертя.

Вступ. Однією з найважливіших проблем трибології та триботехніки є розробка наукових основ сумісності матеріалів у вузлах тертя, а також практичних рекомендацій для створення зносостійких антифрикційних і фрикційних матеріалів, нових технологій зміцнення та нанесення покриттів, нових мастильних матеріалів і присадок до них, в тому числі для біологічних вузлів тертя та деталей [1]. Техніка та технологія триботехнічних покриттів є областю науки і техніки, яка швидко розвивається. Постійно розробляються нові типи покриттів і розширюється їх застосування в різних областях науки і техніки, починаючи від деталей і сполучень машин, а також споживчих товарів до медичних інструмен-

тів і протезів [2]. З другої половини ХХ століття прискореними темпами розвиваються методи газотермічного напилення (ГТНП) і серед них детонаційно-газове напилення поклато початок застосуванню високошвидкісних методів ГТНП [3 – 5]. Серед матеріалів детонаційно-газових покриттів особливий інтерес викликає карбід вольфраму, який використовується в якості твердого компонента різних композицій з металами та іншими тугоплавкими сполуками. Однак триботехнічні властивості детонаційно-газових покриттів вивчені недостатньо, особливо в умовах сухого тертя.

Метою даної статті є дослідження триботехнічних властивостей детонаційно-газових покриттів з порошків сплаву ВК8.

Методика дослідження. Покриття з стандартного порошку ВК8 наносилися на сталеві зразки після токарного оброблення на обладнанні Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля [5, 6]. Струминно-абразивна підготовка поверхонь до напилення не проводилася. Використовували також детонуючу суміш газів ацетилен-кисень в співвідношенні 1:1, а для продувки детонаційної камери згоряння азот.

Мікротвердість одержуваних покриттів при навантаженні 100 г перевищувала 1600 кг/мм². Характерною особливістю детонаційних покриттів є низька пористість (менше 1 %) і висока міцність зчеплення з основним матеріалом. Покриття добре витримують ударні навантаження. Висока міцність детонаційних покриттів пояснюється реалізацією при формуванні шару покриття з окремих частинок механізмів, пов'язаних з їх високошвидкісним зіткненням: пластичною деформацією; підвищенням щільності дислокацій та ін.

Триботехнічні випробування покриттів проводилися в умовах торцевого тертя циліндричних зразків без змащення на спеціально розробленому пристрою (рис. 1) до універсальних металорізальних верстатів з вертикальним шпинделем. У даній робо-

ті використовували вертикально-фрезерний і вертикально-свердлильний верстати. Питоме навантаження на зразки в процесі випробувань зберігалася постійним і дорівнювало 1,0 МПа. Виконувався безперервний запис моменту тертя та температури за допомогою хромель-копелевої термопари, встановленої в нижньому нерухомому зразку на відстані 1 мм від поверхні тертя. У якості нижнього використовувалися зразки з покриттями, а в якості верхнього обертового – з нормалізованої та загартованої сталі 45, а також з покриттям. Зразки з покриттями перед випробуванням піддавалися шліфуванню колами із синтетичних алмазів і припрацьовуванню. Товщина шару покриття, що залишився на зразках після механічної обробки, становила 0,1 – 0,15 мм.

У пристрої верхній зразок (5), що обертається встановлено на оправці (10), яка через сферичну п'яту (11) контактує зі сферичною головкою пальця (9), запресованого в хвостовик (8), встановлений на шпинделі (7) верстата. Обертання від хвостовика передається на зразок штифтами (6). Сферичні п'ята і палець забезпечують самоустановка зразків, що полегшує прилягання зразків по поверхні тертя. Регулювання швидкості обертання верхнього зразка забезпечується зміною числа обертів шпинделя верстата. Нижній нерухоми зразок (12) надітий на циліндричну оправку, яка закріплена на шпинделі (4), встановленому на упорних підшипниках в плаваючому стакані (3). Останній поміщується в напрямних отворах корпусу (13), встановленого на столі (22) верстата. Осьове навантаження на зразки здійснюється важелем (14) з вантажем (16) через хомут (2), закріпленим на стакані.

Для вимірювання моменту тертя на нижньому кінці вала закріплений важіль (21) з натискним гвинтом (1), які мають контакти з пружною балкою (20),

на яку наклеєні дрові датчики опору. Безперервний запис моменту тертя проводиться автоматичним потенціометром (18) типу ЕПР-09 через підсилювач (17). Таріровка силовимірювальної системи проводиться ваговим способом. З цією метою на корпусі встановлений кронштейн (15) з роликом для перекидання троса, на якому підвішуються гири.

Критерій інтенсивності зношування зразків визначався їх періодичним зважуванням і урахуванням масової втрати матеріалів зразків.

Для вимірювання температури в процесі тертя в нерухомому зразку на відстані 1 мм від поверхні тертя встановлена хромель-копелева термопара (19), діаметр дроту якої дорівнює 0,5 мм. Термопара приварюється до зразків методом конденсаторного зварювання. Безперервний запис температури в процесі тертя здійснюється також потенціометром ЕПР-09. В процесі випробувань детонаційних покриттів на зносостійкість можуть варіюватися швидкість ковзання (визначається числом обертів шпинделя використовуваного верстата), питомий тиск, поєднання матеріалів пари тертя, коефіцієнт взаємного перекриття зразків, товщина покриттів, технологічні режими їх напилання та інші параметри. Зміна коефіцієнта взаємного перекриття зразків досягається виготовленням нерухомого зразка з пазами відповідних розмірів.

Таким чином, даний пристрій і методика дозволяють виробляти всебічні дослідження процесів тертя і зносу детонаційних покриттів в умовах сухого тертя. Це необхідно для вибору оптимальних поєднань матеріалів і покриттів для вузлів тертя. Крім того, методика дозволяє оцінювати вплив технологічних параметрів процесу напилання на зносостійкість одержуваних покриттів.

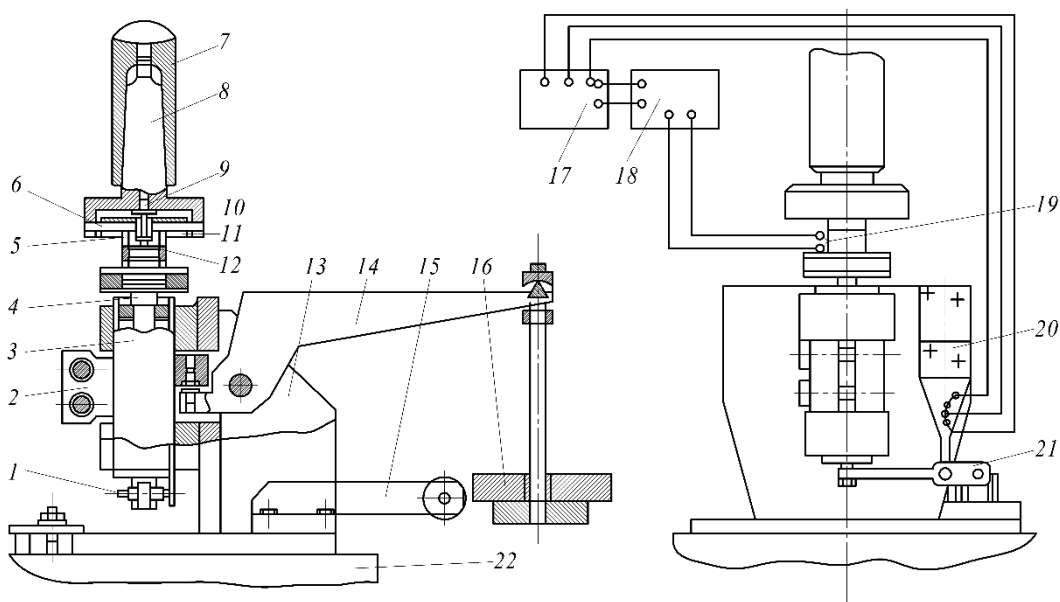


Рис. 1. Пристрій для випробувань покриттів на тертя та зношування

Основні результати. Відповідно до відомої триади *I.V. Крагельського* тертя твердих тіл пов'язано з протіканням трьох послідовних і взаємопов'язаних етапів [1]: 1) взаємодія поверхонь з урахуванням впливу середовища; 2) зміна поверхневих шарів в результаті взаємодії; 3) руйнування поверхневих шарів внаслідок двох попередніх етапів. Основними видами фрикційної взаємодії є: зріз матеріалу; пластичне відтиснення; пружне відтиснення; схоплювання плівок; схоплювання поверхонь. В даних випробуваннях при сухому терті робочим середовищем було атмосферне повітря. Виникаючий в процесі випробувань фрикційний нагрів поверхонь тертя призводить до їх окислення та утворення оксидних плівок. Не виключається також адгезійна взаємодія поверхонь, що труться.

На рис. 2 представлені результати триботехнічних випробувань пари тертя: покриття ВК8 (нижній зразок) – нормалізована сталь 45. Для цього випадку характерно зменшення контрольованих значень коефіцієнта тертя в дослідженому діапазоні швидкостей ковзання від 0,39 до 0,145 і збільшення температури поверхонь тертя з ростом швидкості ковзання (рис. 2, *криві 1, 2* відповідно) до 480 °С. Причому в діапазоні швидкостей ковзання від 0,104 до 0,6 м/с спостерігається більш інтенсивне зниження коефіцієнта тертя (*крива 1*) – від 0,39 до 0,27, при подальшому підвищенні швидкості ковзання темп його зниження зменшується і при 3,14 м/с досягає 0,145. Для температури поверхонь тертя характерно більш плавне збільшення з ростом швидкості ковзання. Спостережуване зменшення темпу зниження коефіцієнта тертя при швидкості ковзання близько 0,6 м/с можна пояснити зміною механізмів взаємодії поверхонь тертя при збільшенні їх температури (*крива 2*).

Істотні відмінності спостерігаються в значеннях і характері зміни критерію інтенсивності зношування з ростом швидкості ковзання зразків з покриттям і без покриття. Для нижнього зразка з покриттям зі зростанням швидкості ковзання спостерігається різке зменшення критерію інтенсивності зношування (рис. 2, *крива 3*), а в діапазоні швидкостей від 0,45 до 1 м/с – її плавне збільшення. При підвищенні швидкості до 1,7 м/с критерій інтенсивності зношування покриття плавно знижується і потім зберігає низьке значення. Ще більш різкі зміни критерію інтенсивності зношування має верхній зразок зі сталі 45 (*крива 4*). У діапазоні швидкостей 0,104 – 0,65 м/с він зменшується від 2,64 до 0,12, тобто в 22 рази. Потім в діапазоні швидкостей 0,65 – 1,42 м/с критерій інтенсивності зношування зростає до 0,74 і зберігає в подальшому приблизно це ж значення.

Поверхні тертя зразків після випробувань вивчалися методом оптичної металогрії для оцінки особливостей фрикційної взаємодії їх структур в умовах сухого тертя ковзання (рис. 3). Збільшення швидкості ковзання призводить до зміни механізму зношування і його інтенсивності.

На поверхні тертя обох зразків спостерігаються широкі і досить глибокі канавки. Процес тертя, осо-

бливо при низьких швидкостях ковзання, характеризується явним виділенням продуктів зносу у вигляді порошку бурого кольору. На зразку зі сталі 45 є більша кількість канавок, а також і розміри їх більше в порівнянні з покриттям. Ці канавки утворюються при коченні виникаючих продуктів зносу.

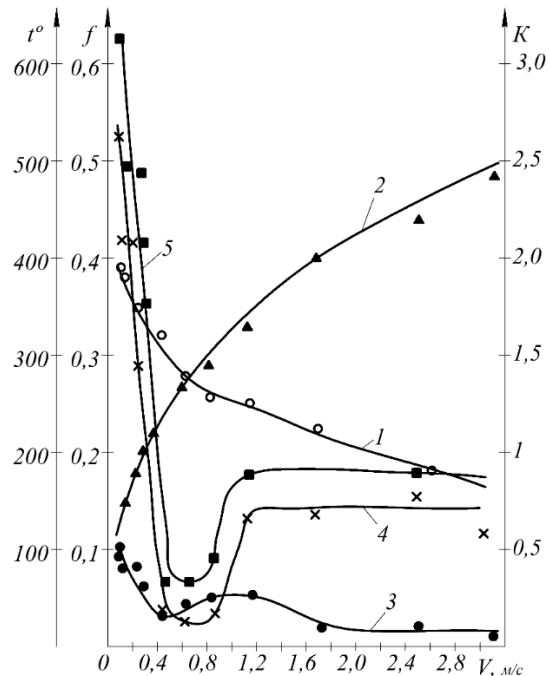


Рис. 2. Вплив швидкості ковзання на параметри тертя і зносу пари тертя: покриття ВК8 – сталь 45: 1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура; 3 – інтенсивність зносу зразка з покриттям; 4 – інтенсивність зносу сталевих зразків; 5 – сумарна інтенсивність зносу зразків

У всьому дослідженому діапазоні швидкостей ковзання інтенсивність зношування зразка без покриття (сталь 45) перевищує інтенсивність зношування покриття ВК8, особливо при низьких швидкостях ковзання до 0,6 м/с, що підтверджує істотний вплив швидкості ковзання на механізм зношування. Інтенсивність зношування різко знижується при збільшенні швидкості ковзання до 0,4 м/с. Причому мінімум інтенсивності зношування сталевих зразків спостерігається при швидкості ковзання 0,62 м/с, що відповідає точці перегину на кривій залежності коефіцієнта тертя. Але вже при швидкості ковзання 0,82 м/с починається різке збільшення інтенсивності зношування аж до швидкості ковзання 1,2 м/с, а при подальшому збільшенні швидкості ковзання залишається на одному рівні.

Порівняємо особливості зношування контактуючих зразків з покриттям і сталі 45. Інтенсивності зношування обох зразків знижуються з ростом швидкості ковзання до значень 0,42 – 0,62 м/с, причому для покриття вона знижується в 3 рази, а для сталі 45 – більш ніж в 25 разів. З подальшим зростанням швидкості ковзання до 1 м/с інтенсивність зношування покриття збільшується лише в 1,6 рази, а сталі 45 – в 8 разів. Таким чином, збіг діапазонів шви-

дкостей ковзання, при яких спостерігається зміна інтенсивності зношування зразків, свідчить про прояв в їх контактні явищ і процесів, що впливають на їх взаємодію. Відшаровування покриттів в процесі випробувань не дивлячись на інтенсивний фрикційний нагрів в процесі випробувань в цьому та інших поєднаннях пар тертя не спостерігалось, що свідчить про високу міцності одержуваних покриттів.

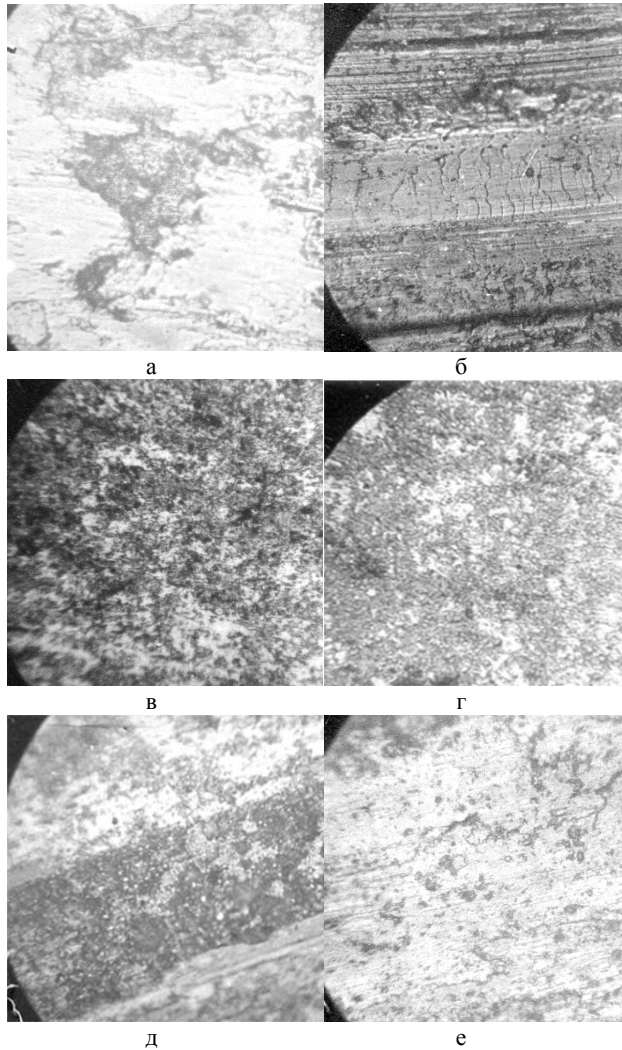


Рис. 3. Мікрофотографії поверхонь тертя ($\times 240$): а – сталь 45, $V = 0,83$ м/с (530 об/хв); б – сталь 45, $V = 2,5$ м/с (1600 об/хв); в – VK8, $V = 0,32$ м/с (195 об/хв); г – VK8, $V = 0,83$ м/с (530 об/хв); д – VK8, $V = 3,14$ м/с (2000 м/хв); е – VK8, $V = 3,14$ м/с (2000 об/хв)

На рис. 4 представлені результати триботехнічних випробувань пари тертя: покриття VK8 (нижній зразок) – загартована сталь 45 ($HRC 40...45$). Для цієї пари тертя при збільшенні швидкості ковзання від 0,104 до 2,5 м/с також спостерігається характерне зменшення контрольованих значень коефіцієнта тертя від 0,4 до 0,15 і збільшення температури поверхонь тертя (рис. 4, *криві 1, 2* відповідно) до $410^\circ C$.

Причому в діапазоні швидкостей ковзання від 0,104 до 0,4 м/с спостерігається більш інтенсивне зниження коефіцієнта тертя (*крива 1*) – від 0,4 до 0,26, при подальшому підвищенні швидкості ковзання темп його зниження зменшується і при 2,5 м/с досягає 0,15. Для температури поверхонь тертя характерно кілька більш різке збільшення з ростом швидкості ковзання. При її значенні близько 1,4 м/с значення температури стабілізується і залишається практично незмінним. Спостережуване зменшення темпу зниження коефіцієнта тертя при швидкості ковзання близько 0,4 м/с можна пояснити зміною механізмів взаємодії поверхонь тертя при збільшенні їх температури (*крива 2*).

Для цієї пари тертя також спостерігаються суттєві відмінності в значеннях і характері зміни інтенсивності зношування з ростом швидкості ковзання зразків з покриттям і без покриття. Але характер зміни інтенсивності зношування істотно відрізняється від пари тертя покриття VK8 – нормалізована сталь 45. Для нижнього зразка з покриттям зі зростанням швидкості ковзання спостерігається різке зменшення інтенсивності зносу (рис. 4, *крива 3*), а при швидкості від 0,4 м/с починається її плавне збільшення, яке стабілізується при значенні швидкості ковзання близько 1,2 м/с. Тут явно спостерігається лише одне екстремальне (мінімальне) значення інтенсивності зношування.

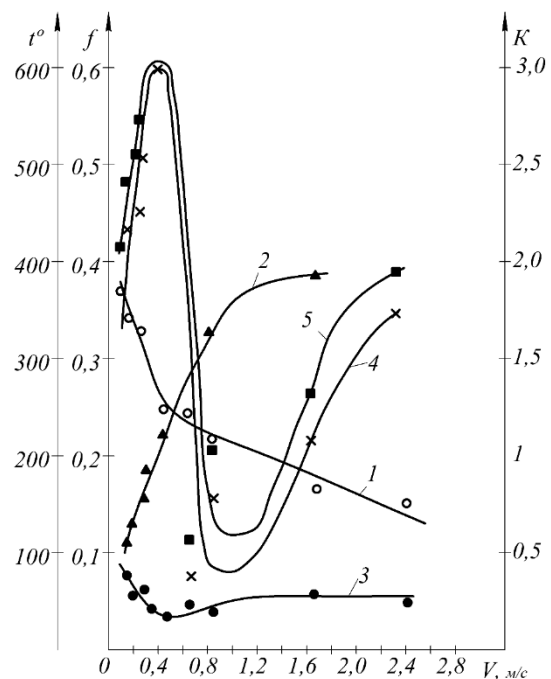


Рис. 4. Вплив швидкості ковзання на параметри тертя і зносу пари тертя: покриття VK8 – сталь 45 ($HRC 40...45$): 1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура; 3 – інтенсивність зносу зразка з покриттям; 4 – інтенсивність зносу сталевго зразка; 5 – сумарна інтенсивність зносу зразків

Ще більш відмінні зміни інтенсивності зношування має верхній зразок із загартованої сталі 45 (*крива 4*). У діапазоні швидкостей 0,104 – 0,4 м/с ін-

тенсивність зношування різко збільшується, а потім більш різко зменшується і при швидкості ковзання 0,6 м/с досягає мінімального значення, а потім починає поступово збільшуватися.

При порівняльному аналізі кривих залежностей від швидкості ковзання інтенсивності зношування обох зразків і коефіцієнта тертя легко виявити критичні значення швидкостей ковзання, при яких зазнають змін механізми тертя та зношування. Так, при швидкості ковзання порядку 0,4 м/с спостерігаються перегин на кривій залежності коефіцієнта тертя, мінімум інтенсивності зношування покриття і максимум інтенсивності зношування загартованої сталі 45. З ростом швидкості ковзання в діапазоні від 0,104 до 0,4 м/с збільшення інтенсивності зношування сталевго зразка супроводжується зменшенням інтенсивності зношування покриття. В діапазоні швидкості ковзання 0,4 – 0,8 м/с різке зменшення інтенсивності зношування сталевго зразка супроводжується плавним збільшенням інтенсивності зношування покриття. При подальшому зростанні швидкості ковзання різке збільшення інтенсивності зношування загартованої сталі супроводжується швидким незначним збільшенням інтенсивності зношування покриття до майже стабільного значення.

На рис. 5 представлені мікрофотографії поверхонь тертя покриття та працюючого з ним в парі зразка із загартованої сталі 45 при швидкості ковзання 3,14 м/с. Тут на доріжках зносу сталевго зразка не спостерігається явних тріщин термічного пошкодження.

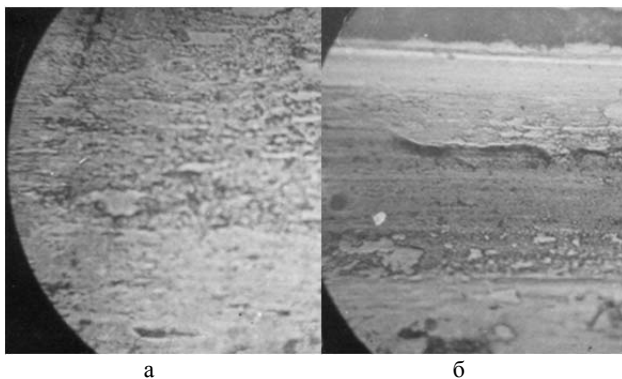


Рис. 5. Мікрофотографії поверхонь тертя ($\times 240$):
а – покриття ВК8, $V = 3,14$ м/с;
б – сталь 45 (HRC 40...45), $V = 3,14$ м/с

На рис. 6 представлені результати триботехнічних випробувань пари тертя: покриття ВК8 – покриття ВК8. Для цієї пари тертя при збільшенні швидкості ковзання від 0,104 до 3,14 м/с також спостерігається характерне зменшення контрольованих значень коефіцієнта тертя від 0,48 до 0,14 і збільшення температури поверхонь тертя (рис. 6, криві 1, 2 відповідно) до 460°C . Причому в діапазоні швидкостей ковзання від 0,104 до 0,64 м/с спостерігається більш інтенсивне зниження коефіцієнта тертя

(крива 1) – від 0,48 до 0,317, при подальшому підвищенні швидкості ковзання темп його зниження зменшується і при 3,14 м/с досягає значення 0,14. Для температури поверхонь тертя даного поєднання матеріалів характерний найбільш різкий темп збільшення з ростом швидкості ковзання від 0,104 до 0,64 м/с. Потім темп збільшення температури знижується, але температура продовжує рости. Точки перегину на кривих для коефіцієнта тертя і температури досить близькі за значенням швидкості ковзання порядку 0,64 м/с, що явно свідчить про зміну механізмів взаємодії поверхонь тертя при досягненні їх температури певного критичного значення.

Дана пара тертя має істотні відмінності в значеннях і характері зміни критерію інтенсивності зношування з ростом швидкості ковзання. По-перше, критерій інтенсивності зношування тут значно нижче в порівнянні з раніше розглянутими парами тертя. По-друге, криві критерію інтенсивності зношування мають кілька екстремумів. По-третє, незважаючи на однаковість матеріалів зразків, верхній з них проявляє знижену інтенсивність зношування в усьому використаному діапазоні швидкостей ковзання (крива 4).

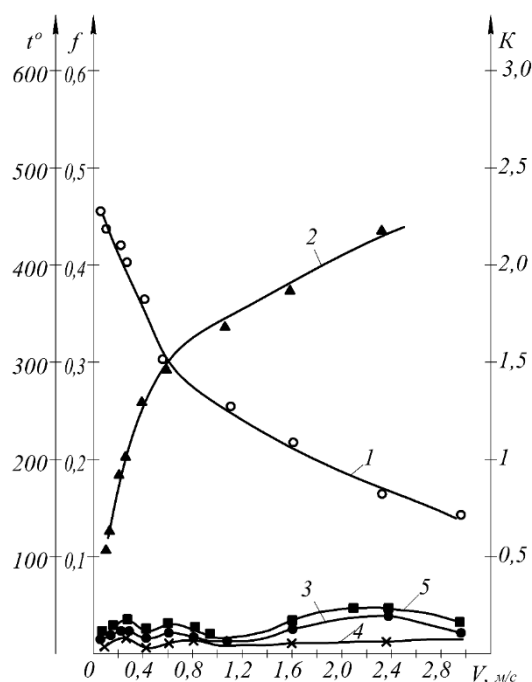


Рис. 6. Вплив швидкості ковзання на параметри тертя і зносу пари тертя: покриття ВК8 – покриття ВК8:
1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура; 3 – інтенсивність зносу нижнього зразка; 4 – інтенсивність зносу верхнього зразка; 5 – сумарна інтенсивність зносу зразків

Критерій інтенсивності зношування обох зразків мінімальний при мінімальній швидкості ковзання 0,104 м/с і плавно збільшується при зростанні швидкості ковзання до 0,3 м/с. Потім інтенсивність зношування також плавно зменшується в міру зростання швидкості ковзання до 0,45 м/с і потім плавно зростає в міру зростання швидкості ковзання для

нижнього зразка до 0,64 м/с і до 0,82 м/с для верхнього зразка. Подальше зростання швидкості ковзання до 1,2 м/с призводить до плавного зниження інтенсивності зношування покриттів на обох зразках до мінімального значення. При подальшому зростанні швидкості ковзання інтенсивність зношування верхнього зразка не змінюється, а нижнього зразка збільшується аж до 2,2 м/с. Потім критерій інтенсивності зношування нижнього зразка плавно знижується. В цілому інтенсивність зношування зразків з покриттям для даної пари тертя (покриття – покриття) є найменшою, за винятком нижнього зразка в діапазоні швидкостей ковзання 1,6 – 3 м/с.

При порівняльному аналізі кривих залежностей від швидкості ковзання інтенсивності зношування обох зразків, температури і коефіцієнта тертя легко виявляються критичні значення швидкостей ковзання, при яких відбувається зміна механізмів тертя і зношування. Так, при швидкості ковзання близько 0,6 м/с спостерігаються перегин на кривій залежності коефіцієнта тертя, якому відповідав би також екстремум інтенсивності зношування покриття на нижньому зразку. Підвищення інтенсивності зношування покриттів при низьких швидкостях ковзання до 0,3 м/с може бути пов'язано з процесом припрацюванням поверхонь тертя. Інші екстремуми на кривих інтенсивності зношування вимагають більш детального аналізу процесів тертя та зношування твердих поверхонь без змащення.

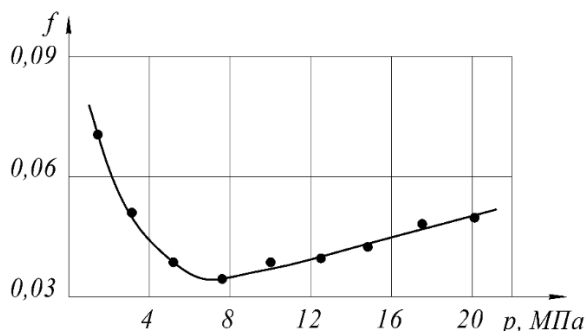


Рис. 7. Залежність коефіцієнта тертя пари вкладиш (покриття ВК8) – ролик (сталь 45, HRC 40...45) від тиску

Проведено також випробування за схемою ролик – вкладиш на машині тертя МІ-1М з мастилом. Застосовували вкладиш з покриттям, а ролик із загартованої сталі 45. У міру збільшення навантаження від 1,2 МПа до 8 МПа коефіцієнт тертя знижувався від 0,07 до значення близько 0,03. У міру подальшого збільшення навантаження коефіцієнт тертя плавно підвищується (рис. 7), зберігаючи значення нижче 0,05 аж до навантажень 40 МПа при низькій інтенсивності зношування зразків. На цій же машині в умовах сухого тертя та питомого навантаженні 3 – 6 МПа встановлена добра припрацьованість покриття зі сталевим роликом при зворотно-поступальному русі верхньої каретки з колодочкою. Обидві поверхні, що труться набувають дзеркального блиску. При порівняльних випробуваннях на

зношування нижнього обертового ролика зі сталі 45 (HRC 45) о верхній нерухомий стійкість до зношування останнього при нанесенні покриття зростала більш, ніж в 10 разів, у порівнянні з загартованою сталлю 45, незважаючи на те, що розміри лунки були менше, а, отже, і вище питомі тиску в зоні тертя.

Висновки. 1. Детонаційно-газовий метод напылення дозволяє отримувати високоміцні покриття з дрібнодисперсних порошків твердих сплавів карбід вольфраму-кобальт.

2. Для всіх пар тертя характерно зменшення коефіцієнта тертя і збільшення температури в зоні тертя з ростом швидкості ковзання (рис. 1). Причому в діапазоні швидкостей ковзання від 0,104 до 0,6 м/с спостерігається більш інтенсивне зниження коефіцієнта тертя, при подальшому підвищенні швидкості ковзання темп його зниження зменшується і при 3,14 м/с досягає 0,145. У дослідженому діапазоні швидкостей ковзання при використанні в якості контртіла сталевих зразків коефіцієнт тертя має дещо менші величини.

Л і т е р а т у р а

1. Основы трибологии (трение, износ, смазка): 2-е изд. Перераб., и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
2. Kenneth Holmberg, Allan Matthews. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, 2nd Edition. – Elsevier Science, 2009. – 576 p.
3. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением // Физика и химия обработки материалов, 1977. № 5. – С. 13 – 24.
4. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов, О.В. Гусев, Б.Л. Рябошапка // Физика горения и взрыва (СО АН СССР), 1975. № 1. – С. 88 – 95.
5. Харламов Ю.А. Научные и технологические основы детонационно-газового напыления покрытий: автореф. ... д.т.н. – Киев, 1995. – 33 с.
6. Харламов Ю.А., Горб Л.Л. Компактная детонационно-газовая установка для нанесения порошковых покрытий // Сварочное производство, 1991, № 1. – С. 18 – 19.

R e f e r e n c e s

1. Osnovi tribologii (trenie, iznos, smazka): 2-e izd. pererab. i dop. / A.V. Chichinadze, E.D. Braun, N.A. Bushe i dr.; Pod obch. red. A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 664 s.
2. Kenneth Holmberg, Allan Matthews. Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, 2nd Edition. – Elsevier Science, 2009. – 576 p.
3. Shorshorov M.Kh., Kudinov V.V., Kharlamov Y.A. Sostojanie i perspektivi razvitija nanesenie pokritij raspileniem // Phizika i khimija obrabotki materialov, 1977. № 5. – S. 13 – 24.
4. Primenenie detonatsii v gazakh dlya naneseniya pokrytij / Y.A. Kharlamov, M.Kh. Shorshorov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev, B.L. Reaboshapko // Fizika gorenija i vzryva (SO AN SSSR), 1975. № 1. – S. 88 – 95.

5. Kharlamov Y.A. Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy detonatsionno-gazovogo napyleniya pokrytiy: avtoref. ... d.t.n. – Kiev, 1995. – 33 s.
6. Kharlamov Y.A., Gorb L.L. Kompaktnaya detonatsionno-gazovaya ustanovka dlya naneseniya poroshkovykh pokrytiy // Svarochnoe proizvodstvo, 1991, № 1. – S.18 – 19.

Харламов Ю.А., Мицьк А.В., Романченко А.В.
Триботехнические свойства покрытий WC-Co

Приведены результаты экспериментального исследования триботехнических свойств детонационно-газовых покрытий из порошка сплава VK8. Покрытия получали напылением стандартного порошка WC-8%Co. Основные исследования проведены в условиях торцевого трения цилиндрических образцов без смазки (сухого трения). Для проведения испытаний при торцевом трении цилиндрических образцов разработано приспособление к металлорежущим станкам. Покрытия наносились на стальные образцы непосредственно после токарной обработки, струйно-абразивная подготовка поверхностей к напылению не проводилась. Изучено влияние скорости скольжения до 3 м/с на коэффициент трения, скорость изнашивания и температуру пар трения: покрытие-нормализованная сталь 45; покрытие-закаленная сталь 45 и покрытие-покрытие. Для всех пар трения характерно уменьшение коэффициента трения и увеличение температуры в зоне трения с ростом скорости скольжения. Причем в диапазоне скоростей скольжения от 0,104 до 0,6 м/с наблюдается более интенсивное снижение коэффициента трения, при дальнейшем повышении скорости скольжения темп его снижения уменьшается и при 3,14 м/с достигает 0,145. В исследованном диапазоне скоростей скольжения при использовании в качестве контртела стальных образцов коэффициент трения имеет несколько меньшие величины.

Ключевые слова: детонационно-газовое напыление, износ, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, скорость скольжения, сплав VK8, сухое трение.

Kharlamov Y., Mitsyk A., Romanchenko A. Tribotechnical properties of WC-Co coatings

The results of an experimental study of the tribotechnical properties of detonation gun sprayed coatings from powder of the VK8 alloy are given. Coatings were obtained by spraying of standard powder WC-8%Co. The main studies were carried out under the conditions of face friction of cylindrical samples without lubrication (dry friction). For testing in face friction of cylindrical specimens, an adaptation to metal-cutting machine tools has been developed. Coatings were applied to steel samples immediately after turning, jet-abrasive preparation of surfaces for spraying was not carried out. The influence of the sliding speed up to 3 m/s on the friction coefficient, wear rate and temperature of friction pairs was studied: coating-normalized steel 45; coating-hardened steel 45 and coating-coating. All friction pairs are characterized by a decrease in the friction coefficient and an increase in temperature in the friction zone with increasing sliding speed. Moreover, in the range of sliding speeds from 0.104 to 0.6 m/s, a more intensive decrease in the friction coefficient is observed, with a further increase in the sliding speed, the rate of friction coefficient decrease to become smaller and at 3.14 m/s reaches 0.145. In the investigated range of sliding speeds when using steel specimens as a counterbody, the friction coefficient is somewhat smaller.

Keywords: detonation gas spraying, wear, wear rate, friction coefficient, sliding speed, VK8 alloy, dry friction.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) yuriy.kharlamov@gmail.com

Мицьк Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 12.02.2019.

УДК 621.891

МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ КАРБІДІВ ВОЛЬФРАМУ ТА ХРОМУ

Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В.

ADHESION STRENGTH OF D-GUN SPRAYED COATINGS ON BASE OF TUNGSTEN AND CHROMIUM CARBIDES

Kharlamov Y., Romanchenko A., Mitsyk A.

Міцність зчеплення є комплексною характеристикою адгезійної та когезійної міцності покриттів. Систематизовано основні конструктивно-технологічні чинники, що впливають на міцність зчеплення газотермічних покриттів. Вивчено міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів на основі карбідів вольфраму та хрому в залежності від виду і складу порошку, матеріалу зразків, способу їх попередньої підготовки, товщини покриття та інше. Показана необхідність розробки моделей для розрахунку та прогнозування міцності зчеплення газотермічних покриттів.

Ключові слова: детонаційно-газове напилення; дистанція напилювання; карбід вольфраму; карбід хрому; твердість; титановий сплав; покриття

Вступ. Сучасна наука і техніка широко використовує різноманітні захисні та функціональні покриття. У відповідній сфері – інженерії поверхні – широко застосовують численні способи отримання покриттів і плівок. Серед них інтенсивно розвивається техніка та технологія газотермічного напилення [1, 2]. Якщо спочатку методи газотермічного напилення ґрунтувалися на механізмі термічної активації взаємодіючих матеріалів, то з середини минулого століття розвиваються високошвидкісні способи, в яких переважно роль відіграє механічний механізм активації. До таких способів відноситься детонаційно-газове напилення (ДГНП) [3 – 8]. Застосування і розвиток протягом тривалого часу ДГНП пов'язано з можливістю міцних і щільних покриттів. Як в перших, так і наступних роботах значна увага приділяється такої важливої властивості покриттів – міцності зчеплення [3 – 5, 9 – 13]. Однак до теперішнього часу механізми формування та утворення міцних покриттів при детонаційно-газовому напиленні ще недостатньо вивчені, що ускладнює розробку технологічних процесів і конструкцій виробів з покриттями. Метою даної статті є аналіз існуючих уявлень про механізми утворення міцного зчеплення покриттів при ДГНП і дослідження міцності зчеп-

лення покриттів на основі карбідів вольфраму та хрому.

Адгезійно-когезійна міцність газотермічних покриттів. Якість та експлуатаційні характеристики газотермічних покриттів незалежно від способу напилення сильно залежать від адгезійної міцності зчеплення між покриттям і основним матеріалом виробу, оскільки відшарування покриття призводить до руйнування системи «покриття-основа». Як правило, це є неприпустимою відмовою. Проте, прогноз і контроль адгезії (міцності зчеплення) покриття є складним, оскільки це залежить від багатьох факторів [6 – 8, 14 – 17]:

- використуваного способу газотермічного напилення та технологічних режимів нанесення покриттів і їх подальшої обробки;
- умов експлуатації виробу з покриттям і методику визначення міцності зчеплення;
- складу та виду вихідного матеріалу покриття, розподілу часток порошку за розмірами і морфологією;
- основного матеріалу напилюваного виробу та стану напилюваної поверхні, в тому числі наявності та стану оксидних плівок (склад і товщина оксиду); шорсткості (висота виступів у порівнянні із середнім розміром сплетів, і відстані між виступами шорсткості основи, яка характеризується середньоквадратичною шорсткістю $R\Delta q$, тобто середньоквадратичне значення ординат профілю шорсткості); чистоти (видалення поверхневих забруднень і залишків абразиву); температури і способу попереднього нагріву перед напиленням при температурі, достатній для видалення адсорбатів і конденсатів, і ін.
- залишкових напружень, що формуються в системі «покриття-основа» як в процесі напилення, так і при подальшій обробці та експлуатації. Ці напруги також залежать від багатьох факторів, в тому числі поєднання матеріалів в системі «покриття-основа», умов напилення та середньої температури поверхні основи та ін.

► умов навколишнього середовища, таких як температура та вологість навколишньої атмосфери, зовнішньої вібрації, що передається в зразок під час випробування, і ін.

Крім того, структура газотермічно напилених покриттів відрізняється від структури компактних матеріалів, оскільки, як правило, вони складаються з напилених одиничних часток (сплетів), реальна поверхня контакту яких становить приблизно від 15 до 60 % їх поверхні, нерозплавлених частинок, сферичних і іншої форми пір, тріщин та ін. Основні механізми схоплювання між газотермічним покриттям і підкладкою, сильно залежать від реальних контактів між сплетами і між сплетами і підкладкою. Вони підрозділяються на три основні групи: (1) механічне (або анкерне) зчеплення; (2) з'єднання металу з металом (явище дифузії); (3) хімічна сполука (утворення інтерметалевого з'єднання з підкладкою).

Характер відшарування (відколу) покриття від основи може бути адгезійним, когезійним або мати змішаний характер. Міцність зчеплення може бути визначена за допомогою механіки руйнування [18, 19], яка враховує енергію, необхідну для виникнення або поширення тріщин, і оцінює адгезію в системі «покриття – основа» з точки зору в'язкості руйнування. Експериментально необхідно встановити умови рівноваги, при яких пружна енергія, створена зовнішньою силою (визначається геометрією зразка та прикладеним навантаженням), врівноважується поширенням стійкої тріщини. При критичному значенні швидкості виділення енергії деформації G_c , Дж/м² відбувається поширення тріщини і, отже, руйнування адгезійного зв'язку в системі «покриття – основа». Однак це вимагає застосування спеціального лабораторного обладнання та зразків матеріалів з покриттями.

Експериментальне дослідження міцності зчеплення. Міцність зчеплення є комплексною характеристикою адгезійної та когезійної міцності покриттів, незалежно від способу і технології їх нанесення. Проведені дослідження міцності зчеплення покриттів на основі карбиду вольфраму з титановими сплавами ВТ9 і ВТ3-1 методом відриву конічного штифта діаметром 1,5 ... 1,6 мм за методикою, описаною в [20, 21]. Товщина покриттів зі стандартних порошоків сплавів ВК8 і ВК15 становила 0,2 ... 0,3 мм. Максимальна міцність зчеплення досягалася при дистанції напилених 150 мм (рис. 1). Поверхня зразків перед нанесенням покриттів піддавалася чистовій токарній обробці. Значний розкид значень міцності зчеплення пов'язаний з наявністю в покриттях дефектів структури і перш за все їх пористості. При використанні дрібнодисперсних порошоків (2 ... 5 мкм) можливими причинами утворення пор являються: інтенсивна коагуляція часток порошку з утворенням великих конгломератів; утворення скупчень порошку на стінках стовбура внаслідок осідання та наступні їх випадкові зриви і перенесення на поверхню деталі та ін. При знаходженні великих пір поблизу границі розділу «пок-

риття – основа» в зоні торця штифта виміряна локальна (місцева) міцність зчеплення виявляється значно нижче середньої.

З цих результатів дослідів випливає, що значення міцності зчеплення і їх розкид трохи нижче для покриттів з більш високим вмістом кобальту, що можна пояснити більш високою часткою металевих зв'язків на площі контакту в системі «покриття – основа».

Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів залежить від способу підготовки поверхні зразків. Критерій R_z , мкм не є достатнім для прогнозування міцності зчеплення, необхідно враховувати і інші параметри, що характеризують напилувану поверхню. При нанесенні покриття зі сплаву ВК15 на титановий сплав ВТ3-1 максимальна міцність досягається при легкій струминно-абразивній обробці (САО) поверхні корундом (табл. 1).

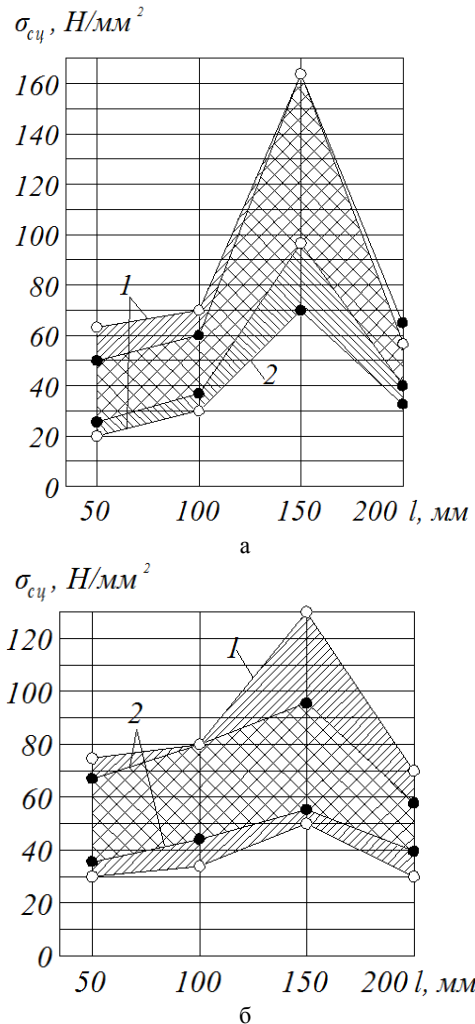


Рис. 1. Залежність міцності зчеплення на відрив покриттів з механічних сумішей порошоків карбиду вольфраму з кобальтом із зразками з титанових сплавів: а – ВТ9; б – ВТ3-1.

Покриття з порошку ВК8 – (1), ВК15 – (2)

При САО поверхні електрокорундом поверхня деталі піддається наклепу з утворенням розвинутого

мікрорельєфу, сприятливого для створення на мікроставуках високих значень напірного тиску під впливом радіально розтікаючихся шарів частинок. Підвищення мікротвердості поверхневого шару не змінює чутливості матеріалу до швидкості деформації та до релаксації напруг, про що свідчить залежність твердості від швидкості деформації, отримана методом кінетичної мікротвердості. Більш висока твердість поверхневого шару деталі сприятлива для локалізації пластичного зсуву в зоні контакту частинок з поверхнею деталі.

Таблиця 1

Вплив способу підготовки поверхні сплаву ВТ3-1 на міцність зчеплення з покриттям з порошку ВК15

Спосіб підготовки поверхні	R_z , мкм	Міцність зчеплення, МН/м ²
Чистова механічна обробка (точіння)	10	50
	14	65
	16	120
Легка піскоструминна обробка корундом зернистістю 450 – 980 мкм при тиску повітря 0,45 МПа протягом 5 с	20	56
	22	101
	24	115
	27	140
Те ж протягом 120 с	36	90
	38	65
	39	35
Дробоструминна обробка сталевими кульками 0,5 ... 1 мм при тиску повітря 0,45 МПа протягом 150 с	2 ... 3	43 ... 72

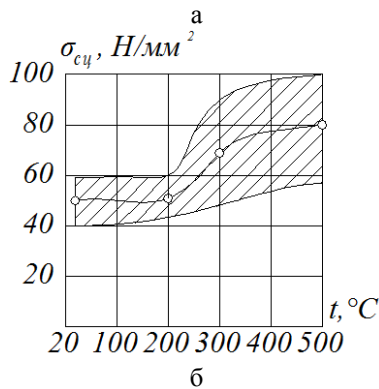
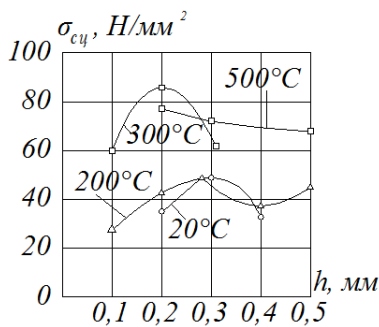


Рис. 2. Залежність міцності зчеплення на відрив покриттів з порошку ВК8 від товщини (а) і температури випробувань (б)

Міцність зчеплення залежить також від товщини покриття і температури випробувань (рис. 2). Температурні випробування проводились при товщині покриттів $0,3 \pm 0,05$ мм. Середньоквадратичне відхилення міцності зчеплення склало в МН/м² при $20^\circ\text{C} - 13,1$; $200^\circ\text{C} - 8,1$; $300^\circ\text{C} - 21,4$; $500^\circ\text{C} - 25,1$. Зростання міцності зчеплення при підвищенні температури пояснюється частковим зняттям внутрішніх залишкових напружень в покриттях.

Вивчено вплив дистанції напилювання на міцність зчеплення твердосплавних покриттів з титановими сплавами при випробуваннях на зсув (рис. 3). Покриття наносили на циліндричні зразки діаметром 19 мм через маску, що забезпечує утворення незамкнутого кільцевого поясу шириною 1,5 ... 3 та товщиною 0,15 ... 0,2 мм. Характер залежностей міцності зчеплення на зріз збігається з подібними залежностями для міцності зчеплення на відрив, однак максимального значення міцність зчеплення досягає при $l = 100$ мм. Це пов'язано зі зміною стану напилюваних частинок і умов обтікання високошвидкісним гетерогенним потоком зразків.

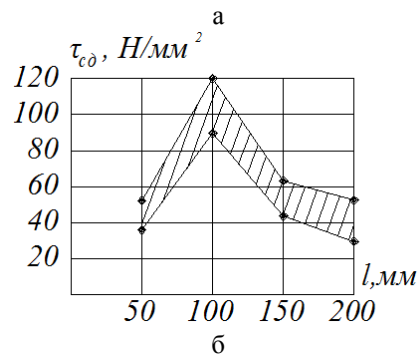
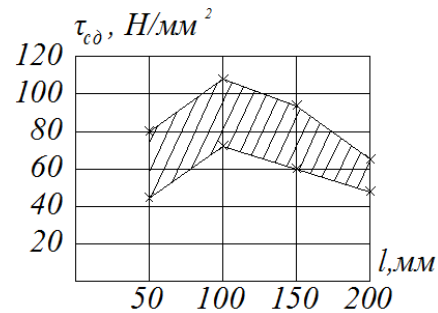


Рис. 3. Залежність міцності зчеплення на зсув покриттів з порошку ВК8 з титановими сплавами ВТ9 (а) і ВТ3-1 (б)

Вивчено залежність міцності зчеплення та інших характеристик покриттів від швидкості переміщення (подачі) напилюваних поверхонь за методикою, описаною в [22, 23]. Зі збільшенням швидкості переміщення міцність зчеплення на відрив і коефіцієнт використання порошку зменшуються (рис. 4). Це пов'язано зі збільшенням відносної площі перекриття одиничних плям напилення, а тим самим зниженням температури основи в зоні формування покриття. Зростає і ступінь впливу перифе-

рійних зон плям напилання, забруднених дрібнодисперсним відкладенням твердих частинок, сажі та ін. Причому зміна швидкості переміщення не впливає на мікротвердість, пористість і фазовий склад покриттів, але зменшує шорсткість поверхні напилених покриттів.

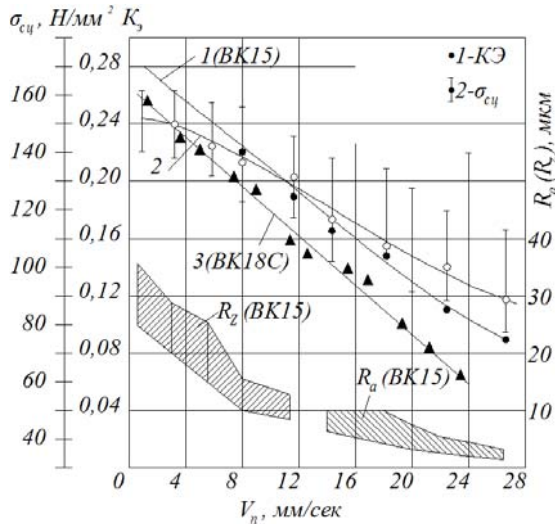


Рис. 4. Залежність міцності зчеплення та інших характеристик покриттів з порошків BK15 і BK18C від швидкості переміщення напилюваної поверхні:

1 – коефіцієнт використання порошку K_e ;

2, 3 – міцність зчеплення на відрив штифтового порошку

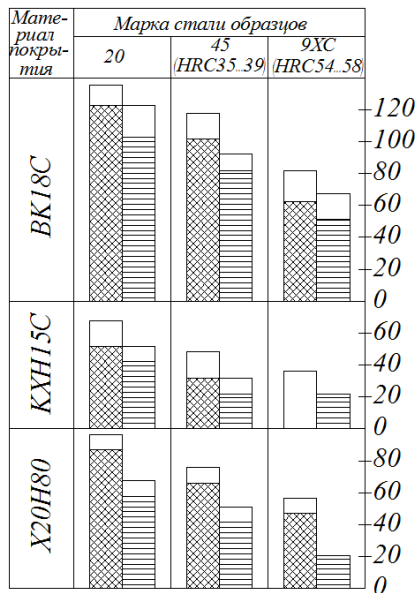


Рис. 5. Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів. Поверхня зразків підготовлена: струменево-абразивною обробкою (косе штрихування); шліфуванням (горизонтальне штрихування)

Проведена серія експериментів по оцінці впливу твердості сталеві основи на міцність зчеплення покриттів. Штифтові зразки для визначення міцності зчеплення [22] виготовляли зі сталі 20 (в стані поставки), сталі 45 (поліпшення $HRC\ 35...39$) і низь-

колегованої інструментальної сталі 9XC (поліпшення, $HRC\ 54...58$). Напилювану поверхню зразків шліфували, а потім деякі з них піддавали струмінно-абразивній обробці (CAO) електрокорундом E14A зернистістю 40 мкм, дистанція при обдувці 100 ... 150 мм, тиск стисненого повітря 0,2 ... 0,25 МПа. Твердість зразків вимірювали після шліфування.

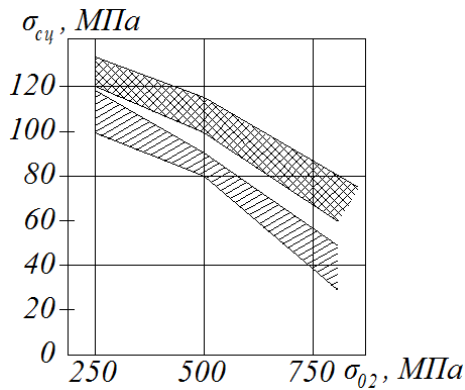
Використовували порошок ніхрома PX20H80 (сплав Cr – 20 %, Ni – 80 %), конгломерований порошок BK18C (WC – 18 % Co) і конгломерований порошок KXH15C (Cr_3C_2 – 15 % Ni). Найменш сприятливим комплексом властивостей з випробуваних матеріалів володіє карбід хрому (відносно висока температура плавлення, найбільше значення параметра важкоплавкості, найменша щільність), а найбільш сприятливим – ніхром.

Зі збільшенням твердості сталевих зразків міцність зчеплення знижується (рис. 5). Найбільшу міцність зчеплення мають покриття з порошку BK18C, найменшою – з порошку KXH15C. CAO напилюваної поверхні сприяє підвищенню міцності зчеплення покриттів. Єдиним критерієм, що визначає міцність зчеплення є критична деформація $\epsilon_{кр}$, при якій порушується суцільність зони контакту основного матеріалу та покриття, що виявляється у вигляді тріщин [24],

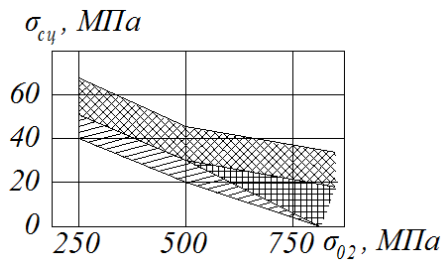
$$\epsilon_{кр} = f\left(\frac{\alpha_C}{\alpha_S}, \frac{E_C}{E_S}, \frac{G_C}{G_S}, \frac{T_{mC}}{T_{mS}}\right),$$

де α , E , G , T_m – коефіцієнт термічного лінійного розширення, модулі пружності та зсуву, температура плавлення. Тут величини з індексом C відносяться до покриття, з індексом S – до основного матеріалу виробу. Однак прямої залежності міцності зчеплення від фізико-механічних властивостей досліджених матеріалів покриттів не спостерігається. Тому необхідно враховувати і інші властивості матеріалів, наприклад, їх крихкість. Найменш шкідливий до крихкого руйнування карбід вольфраму. Цим можна пояснити і більш високі значення міцності зчеплення покриттів на основі WC. Впливають також пористість одержуваних покриттів (більш висока для покриттів на основі карбиду хрому) і відмінності в умовах термодинамічної взаємодії напилюваних частинок з основою. У той же час значений вплив на міцність зчеплення покриттів оказує матеріал основи. Характер зниження міцності зчеплення всіх видів покриттів з ростом границі текучості σ сталеві основи приблизно однаковий (рис. 6). Причому для покриттів на основі карбиду хрому спостерігається більш полого залежність. Більш наочно закономірності зміни міцності зчеплення спостерігаються у вигляді залежності відносини $\sigma_{cy}/\sigma_{0,2}$ від границі текучості сталеві основи $\sigma_{0,2}$ (рис. 7). Найзначніше відносна міцність зчеплення знижується для покриттів на основі карбиду вольфраму, але при

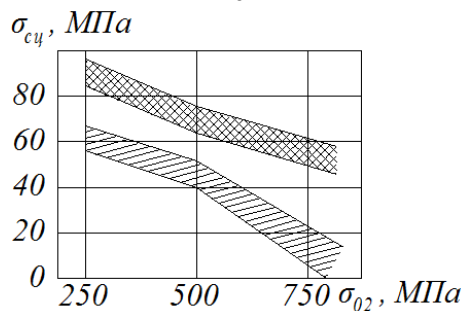
максимальній величині границі текучості основи покриття на основі карбіду вольфраму зберігають високу надійність зчеплення з основою. Для покриттів з ніхрому (рис. 7, в) і особливо на основі карбіду хрому (рис. 7, б) на зразках з високовуглецевої сталі 9ХС надійність зчеплення різко знижується.



а



б



в

Рис. 6. Залежність міцності зчеплення детонаційно-газових покриттів з порошку: ВК18С – (а), КХН15С – (б) і Х20Н80 – (в) від межі текучості сталеві основи. Поверхня зразків підготовлена: струменево-абразивною обробкою (косе штрихування); шліфуванням (горизонтальне штрихування)

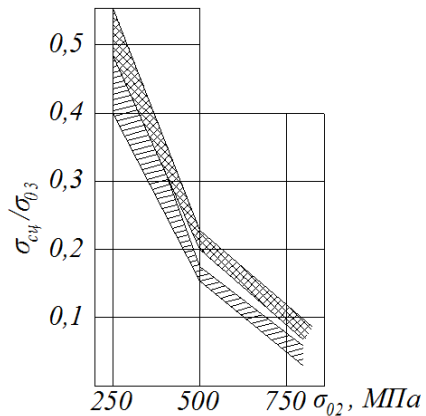
Для покриттів з ніхрому застосування САО зразків веде до найбільш істотного зростання міцності зчеплення (див. рис. 6, 7). Це помітно проявляється і по відношенню до покриттів з карбіду вольфраму.

Оцінимо можливість досягнення в зоні зіткнення напилуваної частки з основою динамічних напружень, рівних границі текучості матеріалу основи, тобто виконання умови

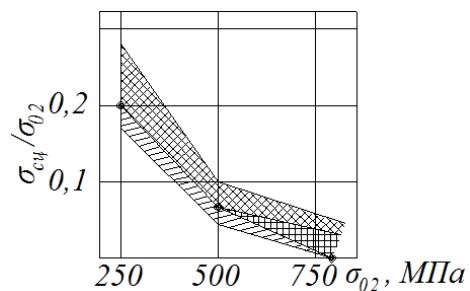
$$\sigma_{дин} \geq \sigma_n,$$

де $\sigma_n = \rho_p V_0^2$ – напірний тиск, ρ_p – щільність матеріалу частинки, V_0 – швидкість зіткнення. Тоді критичне значення швидкості зіткнення:

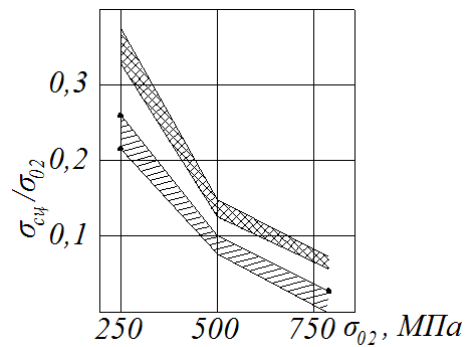
$$V_{0кр} = \sqrt{\sigma_{0,2} / \rho_p}.$$



а



б



в

Рис. 7 Залежність відносної міцності зчеплення $\sigma_{cy} / \sigma_{0,2}$ покриттів від границі текучості сталеві основи $\sigma_{0,2}$: ВК18С – (а), КХН15С – (б) і Х20Н80 – (в) від межі текучості сталеві основи. Поверхня зразків підготовлена: струменево-абразивною обробкою (косе штрихування); шліфуванням (горизонтальне штрихування)

Розрахунки показують, що при детонаційно-газовому напиленні зі швидкостями руху частинок до 500 ... 800 м/хв навіть при максимальних значеннях границі текучості матеріалу основи ця умова дотримується (рис. 8). Отже, досягнення в зоні зітк-

нення часток напружень, рівних або перевищуючих статичну границю плинності матеріалу основи, не є достатньою умовою для утворення їх міцного зчеплення з основою.

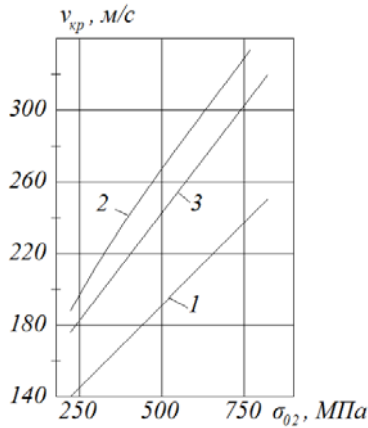


Рис. 8. Критична швидкість зіткнення часток порошку WC (1), Cr₃C₂ (2) і ніхрому (3) для досягнення в зоні зіткнення напружень, рівних границі текучості основи $\sigma_{0,2}$

Для аналізу умов утворення міжатомних зв'язків між матеріалами напилюваної частки і основи скористаємося експериментальними даними про енергію активації сталі в різному структурному стані [25], де енергія активації E'_a отримана в МДж / м³, а вплив зовнішньої сили на енергію активації розриву міжатомних зв'язків враховується величиною $\gamma'\sigma_a^2$, тут γ' в МН/м², а σ_a – середня напружка, що діє на міжатомних зв'язках. Перетворимо відоме рівняння для відносної міцності зчеплення частинки з основою [8],

$$\bar{\sigma} = 1 - \exp \left\{ - \frac{v t_a}{\exp \left[(E'_a - \gamma' \sigma_a^2) V_a k T_k \right]} \right\},$$

де V_a – об'єм атома ($V_a \approx A / N_A \rho$, де A – атомна маса, N_A – число Авогадро (Avogadro), ρ – щільність); v – частота коливань атомів; t_a – час активації основи (дії напірного тиску в зоні контакту); E'_a – енергія активації процесу утворення міжатомних зв'язків (збігається з енергією активації руйнування); γ' – структурно чутливий коефіцієнт, що оцінює активаційний об'єм і перенапружки на міжатомних зв'язках порівняно із середньою напругою в зразку; p – напружки, що діють в контакті частки з основою; k – постійна Больцмана (Boltzmann); T_k – температура контакту «частинка-основа».

Розрахунки з урахуванням отриманих в умовах циклічного навантаження значень E'_a і γ' [25] показують сильну залежність відносної міцності зчеплення від величини динамічних напружень в зоні

контакту. При нанесенні покриттів на сталь 20 зростання динамічних напружень дозволяє істотно знизити контактну температуру, необхідну для утворення міцного зчеплення (рис. 9). У розрахунках приймалося $t_a = 1 \cdot 10^{-7}$ с, $V_a = 1,173 \cdot 10^{-29}$ м, $K = 1,3805 \cdot 10^{-29}$ МДж / град. При нанесенні покриттів на поліпшену сталь 45 роль динамічних напружень в утворенні міцного зчеплення знижується (рис. 10). Для отримання рівномірного з'єднання частки з поліпшеною сталлю 45 при інших рівних умовах потрібні більш високі значення температури в контактній зоні. Причому при однаковому зростанні в порівнянні зі сталлю 20 контактних напружень рівень необхідних для утворення міцного зчеплення температур знижується менш інтенсивно. В обох випадках збільшення контактних напруг зменшує інтервал температур між значеннями відносної міцності $\bar{\sigma}$, близьких до 0 і 1.

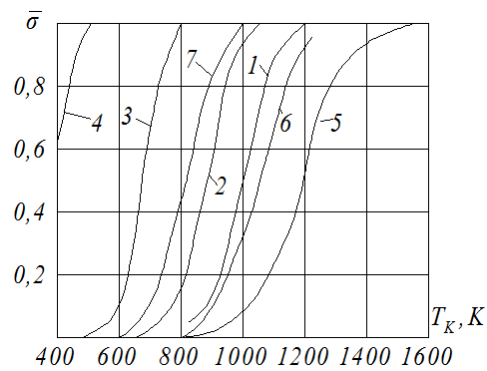


Рис. 9. Розрахункові залежності відносної міцності зчеплення напилюваних частинок зі сталлю 20 при наступних умовах: $\nu = 10^{13}$ с⁻¹ (σ_a , МПа: 100 (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4)); $\nu = 10^{12}$ с⁻¹ (σ_a , МПа: 100 (5), 200 (6), 300 (7))

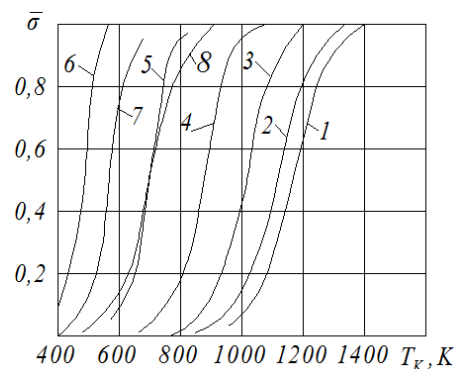


Рис. 10. Розрахункові залежності відносної міцності зчеплення напилюваних частинок з поліпшеною сталлю 45 при наступних умовах: $\nu = 10^{13}$ с⁻¹ (σ_a , МПа: 100 (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4), 500 (5), 600 (6)); $\nu = 10^{12}$ с⁻¹ (σ_a , МПа: 600 (7)); $\nu = 10^{11}$ с⁻¹ (σ_a , МПа: 600 (8))

Висновки

1. Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів залежить від комплексу конструктивно-технологічних факторів, в тому числі поєднання матеріалів в системі «покриття – основа», шорсткості і інших параметрів стану напилюваної поверхні, складу, дисперсності та способу виготовлення порошку і ін.

2. Детонаційно-газове напилення за рахунок високої швидкості напилюваних частинок збільшує роль механічної активації контактуючих матеріалів і обумовлює можливість отримання покриттів з високою міцністю зчеплення при зниженні вимог до підготовки напилюємої поверхні.

3. Відомі уявлення про механізми зчеплення дозволяють отримати лише якісні оцінки міцності зчеплення детонаційно-газових покриттів і потрібна розробка моделей, що враховують комплекс конструктивно-технологічних факторів, що впливають на міцність зчеплення.

Література

1. Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. Газотермическое напыление. Современное состояние и перспективы развития // Вісник Східноукр. нац. університету імені В. Даля, № 2 (226), 2016, с. 5 – 19.
2. Шоршоров М.Х., Кудинов В.В., Харламов Ю.А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением // Физика и химия обработки материалов, 1977. № 5. – С. 13 – 24.
3. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, В.В. Кудинов, О.В. Гусев, Б.Л. Рябошапка // Физика горения и взрыва (СО АН СССР), 1975. № 1. – С. 88 – 95.
4. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука. – 1978. – 224 с.
5. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. – 223 с.
6. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Київ: Наукова думка, 2007. – 558 с.
7. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардаговская. – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
8. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учеб. Для ВУЗов [Текст] / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.; под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 782 с.
9. Kharlamov Y.A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. – P. 159 – 166.
10. О механизме и кинетике формирования прочных покрытий при детонационно-газовом напылении / М.Х. Шоршоров, Ю.А. Харламов, В.В. Кудинов, О.В. Гусев // Защитные покрытия на металлах, вып. 10. – К.: Наук. думка, 1976. – С. 71 – 75.
11. Мовшович А.Я. Исследование влияния физико-механических характеристик детонационных покрытий на износостойкость режущих элементов переналяживаемых штампов / А.Я. Мовшович, Ю.А. Черная,

Г.И. Ищенко // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – № 45. – С. 22 – 28.

12. Фараджаллах М.А., Панарин В.Е., Бись С.С. Проблема технологических остаточных напряжений в повышении качества детонационных покрытий // Вісник Хмельницького національного університету № 2 '2011. – С. 14 – 18.
13. Ряховский А.В., Косенко В.В., Власенко В.Н. Особенности оценки прочности сцепления детонационных покрытий // Системы озброєння і військова техніка, 2012, № 3(31). – С. 215 – 217.
14. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
15. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
16. Ильющенко А.Ф. / Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек // Минск: Бестпринт, 2002. – 480 с.
17. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. - Springer Science + Business Media New York, 2014. – 1587 p.
18. Lin C.K., Berndt C.C. Measurement and analysis of adhesion strength for thermally sprayed coatings // Journal of Thermal Spray Technology, 1994, Vol. 3, issue 1. – P. 75–104.
19. Heintze G.N., McPherson R. Fracture toughness of plasma sprayed zirconia coatings // Surface Coating Technology, 1988, Vol. 134. – P. 15–23.
20. Получение детонационных твердосплавных покрытий из механической смеси мелкодисперсных порошков / Ю.А. Харламов, Л.И. Калинин, В.В. Ришин, Б.Л. Рябошапка, А.Н. Краснов // Порошковая металлургия. – 1978. – № 4. – С. 41–46.
21. Исследование прочности сцепления детонационных покрытий / В.В. Ришин, Ю.А. Харламов, Л.И. Калинин, Б.Л. Рябошапка и др. // Защитные покрытия. – Л.: Наука. – 1979. – С. 100 – 104.
22. Харламов Ю.А., Лившиц М.И. Прочность сцепления и деформируемость материалов с детонационно-газовыми покрытиями из исходного порошка ВК-18С // Порошковая металлургия. – 1983. – № 5. – С. 74 – 78.
23. Влияние скорости перемещения напыляемой поверхности на качество детонационно-газовых покрытий / М.И. Лившиц, Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Э.Н. Капустян // Порошковая металлургия. – 1981. – № 2. – С. 34 – 37.
24. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. – К.: Наук. думка. – 1983. – 264 с.
25. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан, 1985. – 168 с.

References

1. Harlamov Ju.A., Polonskij L.G. Gazotermicheskoe napylenie. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya // Visnyk Shidnoukr. nac. unyversytetu imeni V. Dalja, № 2 (226), 2016, s. 5 – 19.
2. Shorshorov M.H., Kudinov V.V., Harlamov Ju.A. Sostojanie i perspektivy razvitiya nanesenija pokrytij

- raspyleniem // Fizika i himija obrabotki materialov, 1977. № 5. – S. 13 – 24.
3. Primenenie detonacii v gazah dlja nanesenija pokrytij / Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev, B.L. Rjaboshapko // Fizika gorenija i vzryva (SO AN SSSR), 1975. № 1. – S. 88 – 95.
 4. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fiziko-himicheskie osnovy detonacionno-gazovogo napylenija pokrytij. – M.: Nauka. – 1978. – 224 s.
 5. Harlamov Ju.A., Budag'janc N.A. Detonacionno-gazovye processy v promyshlennosti. Lugansk: Izd-vo VUGU, 1998. – 223 s.
 6. Inzhenerija poverhni / K.A. Jushhenko, Ju.S. Borisov, V.D. Kuznecov, V.M. Korzh. – Kiïv: Naukova dumka, 2007. – 558 s.
 7. Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovyh materialov / Ju.S. Borisov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sidorenko, E.P. Ardatovskaja. – K.: Nauk. dumka, 1987. – 544 s.
 8. Poroshkovaja metallurgija i napilennye pokrytija: ucheb. Dlja VUZov [Tekst] / V.N. Anciferov, G.V. Bobrov, L.K. Druzhinin i dr.; pod red. B.S. Mitina. – M.: Metallurgija, 1987. – 782 s.
 9. Kharlamov Y.A. Gaseous pulse detonation spraying: current status, challenges, and future perspective // Intern. Thermal Spray Conference & Exposition ITSC 2008: Maastricht, The Netherlands, June 2-4, 2008. Conference Proceedings. – P. 159 – 166.
 10. mehanizme i kinetike formirovanija prochnyh pokrytij pri detonacionno-gazovom napylenii / M.H. Shorshorov, Ju.A. Harlamov, V.V. Kudinov, O.V. Gusev // Zashhitnye pokrytija na metallah, vyp. 10. – K.: Nauk. dumka, 1976. – S. 71 – 75.
 11. Movshovich A.Ja. Issledovanie vlijanija fiziko-mechanicheskikharakteristik detonacionnyh pokrytij na iznosostojkost' rezhushhih jelementov perenalazhivaemyh shtampov / A.Ja. Movshovich, Ju.A. Chernaja, G.I. Ishhenko // Vestnik Nac. tehn. un-ta «HPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Nove reshenija v sovremennyh tehnologijah. – Har'kov: NTU «HPI». – 2011. – № 45. – S. 22 – 28.
 12. Faradzhalah M.A., Panarin V.E., Bys' S.S. Problema tehnologicheskikh ostatocnyh naprjazhenij v povysenii kachestva detonacionnyh pokrytij // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu № 2 '2011. – S. 14 – 18.
 13. Rjabovskij A.V., Kosenko V.V., Vlasenko V.N. Osobnosti ocenki prochnosti sceplenija detonacionnyh pokrytij // Sistemi ozbroennja i vijs'kova tehnika, 2012, № 3(31). – S. 215 – 217.
 14. Handbook of Thermal Spray Technology, edited by J.R. Davis // Ohio: ASM International. – 2004. – P. 347.
 15. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: 2-nd Ed. / L. Pawlowski // Chichester, England. John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – P. 647.
 16. Il'jushhenko A.F. / Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij: teorija i praktika / A.F. Il'jushhenko, V.A. Okovityj, S.P. Kundas, B. Formanek // Minsk: Bestprint, 2002. – 480 s.
 17. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. - Springer Science + Business Media New York, 2014. – 1587 p.
 18. Lin C.K., Berndt C.C. Measurement and analysis of adhesion strength for thermally sprayed coatings // Journal of Thermal Spray Technology, 1994, Vol. 3, issue 1. – P. 75–104.
 19. Heintze G.N., McPherson R. Fracture toughness of plasma sprayed zirconia coatings // Surface Coating Technology, 1988, Vol. 134. – P. 15–23.
 20. Poluchenie detonacionnyh tverdosplavnyh pokrytij iz mehanicheskoi smesi melkodispersnyh poroshkov / Ju.A. Harlamov, L.I. Kalinin, V.V. Rishin, B.L. Rjaboshapko, A.N. Krasnov // Poroshkovaja metallurgija. – 1978. – № 4. – S. 41–46.
 21. Issledovanie prochnosti sceplenija detonacionnyh pokrytij / V.V. Rishin, Ju.A. Harlamov, L.I. Kalinin, B.L. Rjaboshapko i dr. // Zashhitnye pokrytija. – L.: Nauka. – 1979. – S. 100 – 104.
 22. Harlamov Ju.A., Livshic M.I. Prochnost' sceplenija i deformiruemost' materialov s detonacionno-gazovymi pokrytijami iz ishodnogo poroshka VK-18S // Poroshkovaja metallurgija. – 1983. – № 5. – S. 74 – 78.
 23. Vlijanie skorosti peremeshhenija napyljaemoj poverhnosti na kachestvo detonacionno-gazovyh pokrytij / M.I. Livshic, Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, Je.N. Kapustjan // Poroshkovaja metallurgija. – 1981. – № 2. – S. 34 – 37.
 24. Maksimovich G.G., Shatinskij V.F., Kopylov V.I. Fiziko-himicheskie processy pri plazmennom napylenii i razrushenii materialov s pokrytijami. – K.: Nauk. dumka. – 1983. – 264 s.
 25. Fedorov V.V. Kinetika povrezhdaemosti i razrushenija tverdych tel. – Tashkent: Fan, 1985. – 168 s.
- Харламов Ю.А., Романченко А.В., Мицык А.В., Прочность сцепления детонационно-газовых покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома**
- Прочность сцепления является комплексной характеристикой адгезионной и когезионной прочности покрытий. Систематизированы основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на прочность сцепления газотермических покрытий. Изучена прочность сцепления детонационно-газовых покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома в зависимости от вида и состава порошка, материала образцов, способа их предварительной подготовки, толщины покрытия и др. Показана необходимость разработки моделей для расчета и прогнозирования прочности сцепления газотермических покрытий.*
- Ключевые слова:** детонационно-газовое напыление; дистанция напыления; карбид вольфрама; карбид хрома; твердость; титановый сплав; покрытие
- Kharlamov Y., Romanchenko A., Mitsyk A. Adhesion strength of D-gun sprayed coatings on base of tungsten and chromium carbides**
- Adhesion strength is a complex characteristic of the bonding of a coating to a substrate and coating strength and ductility. The main structural and technological factors affecting the adhesion strength of thermal sprayed coatings are systematized. The adhesion strength of D-gun sprayed composition coatings on base of tungsten carbide and chromium carbide was studied depending on the type and composition of the powder, specimen material, method of the surface pre-spray treatment, coating thickness, etc. The need to develop models for calculating and predicting of the adhesive strength of thermal sprayed coatings is shown.*
- Keywords:** D-gun spraying; spray distance; tungsten carbide; chromium carbide; hardness; titanium alloy; coating.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
alexvromanchenko@gmail.com

Міцик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Чернецька-Білецька Н.Б.**

Стаття подана 12.01.2019.

УДК 535.247.4:535.243

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ
GaAs ПРИ ПОКРИТТІ ГЕРМАНІЄМ****Чернікова І.Д., Черніков М.Г., Зубков С.Ю.****RESEARCH OF ENERGY STRUCTURE SURFACE
GaAs IN COVERING HERMANIA****Chernikova I., Chernikov N., Zubkov S.**

У статті розглянуто вплив адсорбованих шарів германію на поверхню монокристалів арсеніду галію і вивчено фотоємісійним методом в надвисокому вакуумі вплив цих шарів на енергетичний спектр кристала арсеніду галію

Ключові слова: фотоємісія, квантовий вихід, розподіл електронів по енергіях, спектральний аналіз, робота виходу, електронна спорідненість, загин зон, напівпровідники, напівпровідниковий прилад.

Вступ. Арсенід галію і його поверхневі властивості привертають велику увагу дослідників у зв'язку з можливостями його широкого застосування в техніці мікро- і наноелектроніки.

Незважаючи на численні дослідження поверхні напівпровідників, багато питань, що стосуються її властивостей і процесів на кордоні двох фаз, ще недостатньо з'ясовані, особливо це стосується впливу умов на поверхні на енергетичний спектр електронів в кристалах.

Постановка проблеми: Інтерес до цих питань безперервно зростає не тільки з наукової точки зору, але і з практичної – в зв'язку з розвитком напівпровідникової мікро- та наноелектроніки. Розвиток таких її розділів, як тонкошарова наноелектроніка та оптоелектроніка, пристрої з МДП структурами і зарядним зв'язком, холодних катодів і ефективних фотокатодів і ін. Вимагають розуміння процесів в поверхневому шарі напівпровідника як при вільній поверхні, так і при адсорбції на її поверхню інших речовин. Це важливо так само для з'ясування можливості бажаним чином змінювати поверхневі і приповерхневі властивості твердих тіл.

Зі сказаного випливає, що адсорбція чужорідних атомів на поверхню монокристалів GaAs істотно впливає на фотоємісію. Однак ще недостатньо вивчено: вплив покриттів на властивості поверхневого шару арсеніду галію, на структуру енергетичного спектра електронів, не з'ясоване в якій мірі різні покриття впливають на загин зон і електронну

спорідненість до електрону, що істотно для з'ясування способу зменшення роботи виходу фотоелектронів. Вибір таких покриттів обумовлений тим, що різні речовини (метали, діелектрики, напівпровідники) значно відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями, і тому наявність їх на поверхні твердого тіла має надавати різний вплив як на властивості поверхні напівпровідника, так і на структуру зон в приповерхневої області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких розглянуто розв'язання даної проблеми і на які спирається автор: Змінюючи умови на поверхні, наприклад, якщо наносити чужорідні атоми на поверхню речовини, можна впливати на властивості приповерхневого шару. Дослідження показують, що адсорбція речовини на підкладку твердого тіла призводить до різних змін характеристик поверхні твердого тіла, таких як робота виходу [1,2], рухливість носіїв струму в приповерхневому шарі [3], фотоємісійні властивості [4÷6] та ін. Ці зміни відбуваються як внаслідок виникнення електричного поля в шарі приповерхневого об'ємного заряду, так і в зміні електронної структури твердого тіла поблизу поверхні.

Вивчення поверхні твердих тіл і її впливу на фізичні властивості останніх проводяться різними методами: оптичними, дифракцією повільних електронів, ефекту поля, дослідження контактної різниці потенціалів, методами електронної спектроскопії, а також методом фотоємісії. Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки [7]. Однак перевага методу фотоємісії полягає в тому, що він дозволяє отримувати більшу інформацію про енергетичний спектр електронів в напівпровідниках і, таким чином, дає можливість простежити за змінами цього спектру при зміні умов на поверхні.

Особливо багато робіт останнім часом присвячено вивченню фотоємісійним методом впливу адсорбції Cs, Cs-O [8÷10] на поверхневі властивості арсеніду галію. Це обумовлено тим, що в цьому ви-

падку виходить ефективний емітер з негативною електронною спорідненістю до електрону [11÷13]. Однак більшість таких досліджень носить чисто практичний характер і в них не приділяється належної уваги з'ясуванню поверхневих властивостей арсеніду галію.

Висока ефективність фотоemisії з сильно легovanого цинком GaAs р-типу ($p \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) при адсорбції Cs-O обумовлена умовами, що виникають в цьому випадку появою негативною спорідненості до електрону [13], однак висока ефективність фотоemisії спостерігалася і у зразків GaAs р-типу зі значно меншим рівнем легування германієм ($p \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при такій же обробці поверхні цезієм Cs і киснем O [14].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття:

Можна припустити, що висока ефективність фотоemisії у зразків GaAs р-типу, легованих германієм, могла бути обумовлена або впливом германію на об'ємні властивості, або утвореними особливими умовами на поверхні арсеніду галію внаслідок присутності там атомів германію.

Постановка задачі: У зв'язку з цим виникає інтерес з'ясувати, як впливає адсорбція атомів германію на фотоemisії із зразків монокристалів арсеніду галію різного типу провідності.

Мета статті: Вивченню впливу адсорбції атомів германію на властивості приповерхневого шару арсеніду галію, а також на структуру енергетичного спектра електронів використані методи фотоemisії:

- спектрального розподілу квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$;
- енергетичного розподілу фотоелектронів $N(E)$.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів:

Дослідження проводилися в нанометричному надвисоковакуумному фотоелектронному спектрометрі [15] на зразках GaAs (як n-типу, так і р-типу) фізичні параметри яких представлені:

- концентрації носіїв струму відповідно для кожного використаного зразка n-типу: $5 \cdot 10^{15} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,24 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $3,1 \cdot 10^{18} \text{ (см}^{-3}\text{)}$ і р-типу $1,4 \cdot 10^{19} \text{ (см}^{-3}\text{)}$;
- рухливості зразків n-типу відповідно: $4350 \text{ (см}^2\text{/В·с)}$, $4000 \text{ (см}^2\text{/В·с)}$, $3200 \text{ (см}^2\text{/В·с)}$, і р-типу $42,3 \text{ (см}^2\text{/В·с)}$;

- питомі опору зразків n-типу відповідно: $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом·см)}$, $3,84 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом·см)}$, $9,47 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом·см)}$, $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом·см)}$.

Орієнтація площин контролювалася рентгеноструктурним методом, і відхилення від зазначеного напрямку не перевищувало $\pm 1,5^\circ$. У кожного з чотирьох: 1n – (110); 2n – (110); 3n – (111); 4p – (110) досліджених зразків емітуючі площини шліфувалися і хімічно полірувалися в суміші 1 (H₂O₂): 3 (H₂SO₄): 1 (H₂O).

Всі дослідження при різних товщинах покриття германієм поверхні арсеніду галію проведені в од-

накових вакуумних умовах ($p = 2 \cdot 10^{-9}$ Торр), отримані результати для всіх зразків можна було порівняти між собою. Товщина адсорбованого шару германію визначалася за часом нанесення Ge з каліброваного джерела. Товщина плівки при одному циклі покриття становила $\sim 3\text{Å}$ і з огляду на розміри атомів германію (радіус атомів германію становить $\sim 1,32\text{Å}$) можна вважати, що утворена плівка відповідає моношаровому покриттю поверхні арсеніду галію германієм.

Калібрування джерела напилювання проводили інтерференційним методом Толанського для вимірювання товщини шарів германію, що випаровуються.

а) Спектральний розподіл квантового виходу $Y(h\nu)$ електронів з GaAs при покритті його поверхні германієм:

При всіх покриттях вимірювався спектральний розподіл квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$. Результати таких вимірювань для зразка 2n представлені на рис. 1. Видно, що при адсорбції германію на поверхню арсеніду галію квантовий вихід збільшується (крива 2). Максимальний квантовий вихід спостерігається при ступенях покриття $\theta = 2$ -м моношарів. А при ступеня покриття вже $\theta = 3$ -м моношарів квантовий вихід починає зменшуватися.

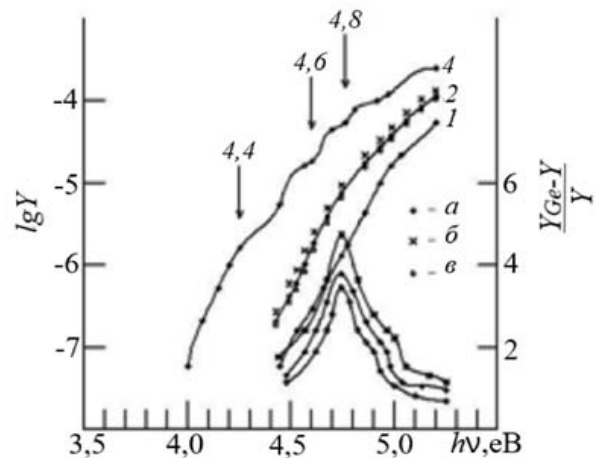


Рис. 1. Спектральний розподіл квантового виходу GaAs (зразок 2n): 1 – без покриття Ge; 2 – при покритті Ge {а} • – 1 моношар; б) × – 2 моношара; в) ○ – 3 моношара}; 4 – спектральний розподіл при покритті бар'єм ($\theta = 0,5$ моношару); 3 – відносне збільшення квантового виходу при покритті

Структурних особливостей на розглянутих кривих не спостерігається, не виявлено також і помітної зміни довгохвильового кордону фотоemisії.

Знайдене значення порога фотоemisії (з екстраполяції $Y^{1/3}$ від $h\nu$) для зразка 2n було $h\nu_0 = 4,24 \text{ eV}$. Настільки незначним зменшенням фотоелектронної роботи виходу неможливо пояснити спостережуваним збільшенням квантового виходу.

Відносне збільшення квантового виходу $(Y_{\text{Ge}} - Y)/Y$ в залежності від енергії фотонів (криві 4, рис. 1.) істотно відрізняється від відповідних залеж-

ностей в разі покриття поверхні GaAs бар'єром Ва і киснем О [16] і має вибіркового характер. При енергіях фотонів, відповідним між зонним переходам ($h\nu = 4,6$ eВ і $h\nu = 4,8$ eВ) спостерігається найбільше збільшення квантового виходу фотоemisії. Такі залежності мають місце у всіх вивчених зразків арсеніду галію при покритті германієм.

Виборче відносно збільшення квантового виходу фотоemisії ($Y_{Ge} - Y)/Y$ при покритті поверхні GaAs германієм показує, що дипольний механізм зменшення роботи виходу при наявності на поверхні чужорідних атомів в даному випадку не має місця.

При нанесенні на покриті германієм поверхні арсеніду галію шару бар'єру ($\theta = 0,5$ моношару) з'являються структурні особливості (крива 3, рис. 1) при енергії фотонів: $h\nu = 4,8$ eВ; $h\nu = 4,6$ eВ і $h\nu = 4,4$ eВ, що, як показано [15] відповідає оптичним переходам в GaAs. Це дозволяє припустити, фотоemisія відбувається з арсеніду галію.

Для з'ясування причини зростання квантового виходу $Y(h\nu)$ (криві 2, рис. 1) при покритті поверхні арсеніду галію Ge були проведені експериментальні дослідження по вивченню розподілу фотоелектронів по енергіям $N(E)$ у зразків 2п і 4р.

б) Енергетичний розподіл фотоелектронів $N(E)$ з GaAs при покритті його поверхні Ge:

Вимірювання розподілу фотоелектронів по енергіях проводилося як на не покритій, так і на покритій германієм поверхні зразків 2п і 4р (рис. 2.). Видно, що при всіх ступенях покриття θ розподіли мають два максимуми, один з яких I відповідає прямому між зонному переходу в арсеніді галію ($E = 4,6$ eВ) і спостерігається також в енергетичному розподілі у непокритого германієм зразка. Другий максимум II для обох досліджених зразків розташований на однаковій енергетичній відстані від максимуму I.

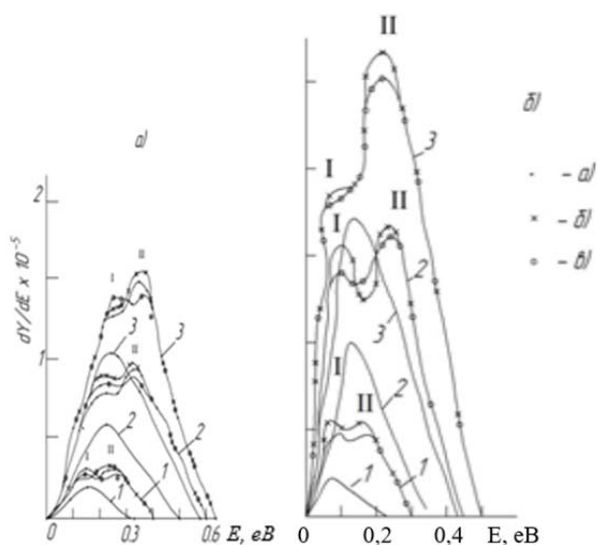


Рис. 2. Розподілу фотоелектронів по енергіях для зразків 2п (а) і 3р (б). Криві зняті при різних значеннях фотонів $h\nu$, eВ: 1 - 4,68; 2 - 4,89; 3 - 4,99 (без покриття германієм), 1' - 4,68; 2' - 4,89; 3' - 4,99 (при покритті германієм: {а} • - 1 моношар; б) × - 2 моношару; в) ° - 3 моношару}

Ця енергетична відстань менше енергетичної відстані між максимумом на кривих 4 рис.1. У зразка 4р інтенсивність максимуму II при покритті германієм $\theta = 2$ значно більше, ніж інтенсивність максимуму I. У зразка 2п відмінності між інтенсивностями максимумів I і II багато менше.

При зміні ступеня покриття θ германієм інтенсивність максимумів I і II змінюється: зі збільшенням інтенсивності максимуму II інтенсивність максимуму I зменшується. Найбільша інтенсивність максимуму II спостерігається при $\theta = 2$ -м моношарі, але при $\theta = 3$ -м моношарі інтенсивність цього максимуму зменшується, а зростає інтенсивність максимуму I.

Зі зміною енергії $h\nu$ фотонів, як видно з представлених експериментальних даних (рис. 2.) максимумами I і II зміщуються за шкалою енергій так, що $\Delta E_{\max} \neq \Delta h\nu$. Це вказує на те, що електронні переходи, що спостерігаються, є прямими. Енергія електронного переходу, відповідна максимуму II на кривих енергетичних розподілів, дорівнює 4,7 eВ. Переходу з такою енергією для GaAs не існує.

Подібного переходу не виявлено і при дослідженні GaAs зі зниженою роботою виходу за допомогою нанесення покриття Ва [17] ВаО [18], а також в роботах інших авторів.

Якщо допустити, що спостережуваний перехід обумовлений оптичним збудженням електронів в шарі германію, то інтенсивність цього переходу, в міру зростання ступеня покриття θ поверхні арсеніду галію германієм повинна також зростати. Однак зі збільшенням ступеня покриття θ інтенсивність цього електронного переходу зменшується, як це спостерігається в експерименті (рис. 2, а і 2, б - криві 3'б і 3'в). Отже приписувати цей електронний перехід тільки германію немає підстав.

Авторами в роботі [19] було показано значення локальної дії електричного поля на локальну електронну структуру твердо тіла. Якщо припустити, що в разі взаємодії германію з арсенідом галію відбувається аналогічне вплив атомів германію на електронну структуру арсеніду галію, то додатковий максимум, можливо, і обумовлений таким впливом.

Аналіз енергетичних розподілів, проведений за методом зміщення енергетичних розподілів на величину енергії фотонів $h\nu$ (мал.3,а. і мал.3,б.), показав, що при адсорбції атомів германію на поверхню монокристалів арсеніду галію має місце незначне зменшення фотоелектронної роботи виходу. Це зменшення (мал. 3,а.) для зразка 2п обумовлено зміщенням низькоенергетичного краю розподілу $(E_F - L_2) > (E_F - L_1)$, тобто обумовлено зміною електронної спорідненості χ . Для зразка 4р спостерігається незначне зміщення високо-енергетичного краю ΔH в сторону рівня Фермі E_F , тобто загин зон незначно зменшується; низькоенергетичний край розподілу L_1 зміщується так, що $(E_F - L_2) > (E_F - L_1)$, а, отже, і для зразка GaAs р-типу при адсорбції на його поверхню германію електронна спорідненість χ зменшується.

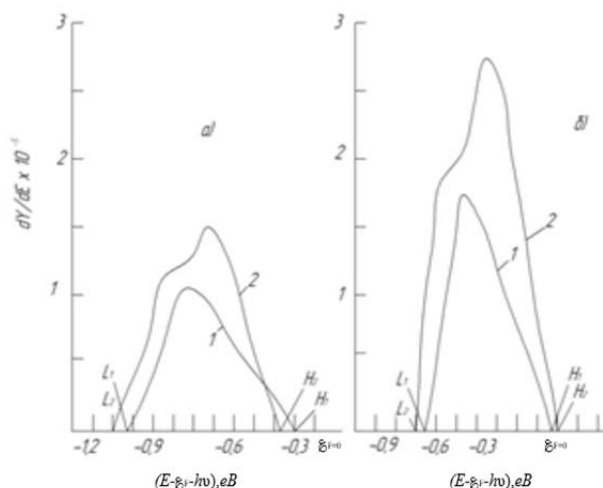


Рис. 3. Зміщені на $h\nu$ енергетичні розподілу фотоелектронів із зразків 2n (а) і 4p (б). Криві: 1 – без покриття германієм; 2 – при покритті германієм. Енергія фотонів $h\nu = 4,99$ eV

Енергетичні параметри, експериментально отримані для зразків 2n і 4p з спектральних розподілів квантового виходу і енергетичних розподілів фотоелектронів, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

№ образца	$h\nu_0$, eV	φ_T , eV	$(E_F - E_v)$, eV	$(E_F - E_v)_s$, eV	χ , eV	φ_0 , eV
2n	4,30	4,13	1,372	0,17	2,90	1,20
2n _{Ge}	4,24	4,06		0,18	2,84	1,19
4p	4,43	4,33	-0,032	0,10	3,03	-0,13
4p _{Ge}	4,34	4,23		0,06	2,94	-0,09

З представлених в таблиці результатів видно, що зменшення порогу фотоемісії $h\nu_0$ і термоелектронної роботи виходу φ_T у зразків GaAs n-типу при адсорбції атомів Ge на поверхню монокристалів арсеніду галію обумовлено зменшенням електронної спорідненості χ . Положення рівня Фермі E_F залишається майже без зміни. У зразка GaAs p-типу при адсорбції атомів Ge на поверхню монокристалів арсеніду галію поряд зі зменшенням електронної спорідненості χ , спостерігається незначна зміна загину зон φ_0 на поверхні електронів GaAs

Таким чином, причини появи і поведінки другого максимуму на його поверхню атомів Ge остаточно не виявлено.

Однак спостерігається збільшення квантового виходу при енергіях фотонів $h\nu$, відповідних прямим міжзонними переходами в GaAs (рис. 1, криві 4), і характер поведінки максимумів в енергетичних розподілах фотоелектронів при зміні $h\nu$ і ступеня покриття θ (рис. 2,а і 2,б.) дозволяє припустити, що взаємодія атомів германію з атомами арсеніду галію призводить до локальної зміни електронної структури в напівпровіднику.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Проведено дослідження фотоемісії із зразків GaAs різного типу провідності при адсорбції на його поверхню германію. Адсорбція германію на

поверхню арсеніду галію приводить до зростання квантового виходу $Y(h\nu)$ у всій області вивченого спектра енергії фотонів. Це зростання $Y(h\nu)$ неможливо пояснити спостережуваним зменшенням фотоелектронної роботи виходу ϕ_0 . Відносне збільшення квантового виходу при покритті поверхні в GaAs германієм має вибіркового характеру. Найбільше відносне збільшення $(Y_{Ge} - Y)/Y$ спостерігається при енергії фотонів $h\nu$, яка відповідає прямим переходам в GaAs в напрямку Σ з енергією 4,6 eV і переходу $\Gamma 1.5v \rightarrow \Gamma 1.5c$ з енергією 4,8 eV.

2. В енергетичних розподілах фотоелектронів, поряд з максимумом, χ соответствующим переходу в GaAs в напрямку Σ з енергією 4,6 eV, спостерігається додатковий максимум з енергією 4,7 eV. Цей додатковий максимум не можна приписати прямому переходу GaAs, а також переходу в Ge.

3. Зміна термоелектронної роботи виходу φ_T при адсорбції германію на поверхню арсеніду галію обумовлено зменшенням електронної спорідненості χ , а у зразка GaAs p-типу при цьому спостерігається незначне зменшення зон.

4. Взаємодія германію з арсенідом галію, можливо, призводить до локальної зміни електронної структури в GaAs, що, мабуть, і приводить до появи додаткового електронного переходу і стимулює підвищення фотоемісії.

У перспективі планується розглянути цей експеримент більш детально з використанням додаткових оптичних методів дослідження суті питання прямих електронних переходів.

Література

1. Ляшенко В.И. Электронные явления на поверхности полупроводников / В.И. Ляшенко, В.Г. Литовченко, И.И. Степко, В.И. Стриха, Л.В. Ляшенко – К.: Наукова думка, 1969.–358 с.
2. Киселев В.Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / В.Ф. Киселев – М.: Наука, 1971.– 320 с.
3. Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников / А.В. Ржанов – М.: Наука, 1973. – 268 с.
4. Волькенштейн Ф.Ф. Физико-химия поверхности полупроводников / Ф.Ф. Волькенштейн – М.: Наука, 1980.– 345 с.
5. Scheer J., The influence of cesium adsorption on surface Fermi level position in gallium arsenide / J. Scheer, J van Laar.– Surf. Sci., 1969, 18 p. 130 – 139.
6. Gobely G.Q., Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Comparison with Si and Ge / G.Q.Gobely, F.G. Allen – Phys. Rev. 1965. 137. p. A245 – A249.
7. Кремков М.В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела / М.В. Кремков – Академия наук Узбекской ССР. Институт электроники имени У.А. Арифова; Ташкент: изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986.– с.164.
8. James L.W. Photoemission from GaAs of p-type at adsorption of Cs and O / L.W. James, J.L. Mool – Phys. Rev.,1969. 183. p. 740 – 745.

10. Eden R.C., Photoemissive properties of p-type gallium arsenide in the adsorption of cesium and oxygen / R.C. Eden, J.L. Mool, W.E. Spicer – Phys. Rev. Lett., 1969.– 18. p. 597 – 600.
11. Scheer J. Effect of Cesium and Oxygen on the Threshold of Photoemission from the Surface of Gallium Arsenide / J. Scheer, J van Laar – Sol. St. Comm., 1965. 3 p. 189 – 194.
12. Sonnenberg H. Photocathodes of gallium arsenide with negative electron affinity / H. Sonnenberg – Appl. Phys. Lett., 1970. 16. p. 245 – 248.
13. Fischer T.E. Determination of Semiconductor Surface Properties by means of photoelectric emission / T.E. Fischer – North-Holland Publishing Co., Emgsterdam, Surface Science, 1969, 13. p. 30 – 52.
14. Sommer A.H. Photoemitters with negative electron affinity / A.H. Sommer – J. Appl. Phys., 1972 42 p. 2158 – 2164.
15. Schade H. High efficiency of emission from GaAs photocathodes doped with Ge / H. Schade, H. Nelson, H. Kressel – Appl. Phys. Lett., 1971. 18 p. 121 – 126.
16. Кулышев А.М., Нанометрический корпускулярный фотоэлектронный спектрометр / А.М. Кулышев, И.Д. Черникова., Н.Г. Черников – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Северодонецьк: вид-во СХУ ім. В. Даля, №5(222) 2015 – с. 40 – 45.
17. Бова А.Р. Влияние структурных изменений на поверхности на энергетический спектр электронов в арсениде галлия / А.Р. Бова, М.А. Волошин, О.Б. Латиш, И.Д. Черникова, Н.Г. Черников – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, №12(154), ч. 2., 2010. – с. 40 – 45.
18. Кормилицина Е.В., Фотоэмиссионная спектроскопия из поверхности GaAs / Е.В. Кормилицина, И.Д. Черникова – Матеріали XVIII міжнародної науково-техн. конф., м. Северодонецьк 17 – 18 квітня 2015 р., ч. 2.– с. 81 –84.
19. Кулышев А.М. Влияние состояния поверхности полупроводников на работу выхода фотодетекторов / А.М. Кулышев, И.Д. Черникова, Н.Г. Черников – Вісник СХУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. Луганськ: вид-во СХУ ім. В. Даля, №2(226), 2016. – с. 112 – 123.
20. Bergstresser T.K. The effect of germanium impurities on the emission properties of p-type gallium arsenide / T.K. Bergstresser, S.W. Rublof – Phys. Rev. Lett., 1973. 30, p. 794 – 799.
- Gobely, F.G. Allen – Phys. Rev. 1965. 137. p. A245 – A249.
7. Kremkov M.V. Korpuskulyarnaya nizkoenergeticheskaya diagnostika poverkhnosti tverdogo tela / M.V. Kremkov – Akademiya nauk Uzbekskoy SSR. Institut elektroniki imeni U. A Arifova; Tashkent: izd-vo «FAN» Uzbekskoy SSR, 1986.– s.164.
8. James L.W. Fotoemisiya from GaAs of p-type at adsorption of Cs and O / L.W. James, J.L. Mool – Phys. Rev., 1969. 183. p. 740 – 745.
9. Eden R.C. Photoemissive properties of p-type gallium arsenide in the adsorption of cesium and oxygen / R.C. Eden, J.L. Mool, W.E. Spicer – Phys. Rev. Lett., 1969. 18. p. 597 – 600.
10. Scheer J., Effect of Cesium and Oxygen on the Threshold of Photoemission from the Surface of Gallium Arsenide / J. Scheer, J van Laar – Sol. St. Comm., 1965. 3 p. 189 – 194.
11. Sonnenberg H. Photocathodes of gallium arsenide with negative electron affinity / H. Sonnenberg - Appl. Phys. Lett., 1970. 16. p. 245 - 248.
12. Fischer T.E., Determination of Semiconductor Properties, North-Holland Publishing Co., Emgsterdam / T.E. Fischer, Surface Science, 1969, p. 30 - 52.
13. Sommer A.H. Photoemitters with negative electron affinity / A.H. Sommer - J. Appl. Phys., 1972. 42 p. 2158 – 2164.
14. Schade H. High efficiency of emission from GaAs photocathodes doped with Ge / H. Schade, H. Nelson, H. Kressel - Appl. Phys. Lett., 1971. 18. p. 121-126.
15. Kulyshv A.M., The nanometric corpuscular photoelectronic spectrometer / A.M. Kulyshv, I.D. Chernikova, N.G. Chernikov - Вісник СХУ ім. В. Дал, sb. sciences. prac. Северодонецьк: view of SNU ім. В. Даля, №5 (222) 2015. - с. 40 - 45.
16. Bova A.R. Influence of structural changes on the surface on the energy spectrum of electrons in gallium arsenide / A.R. Bova, M.A. Voloshin, O.B. Latish, I. D. Chernikova, N.G. Chernikov - Вісник СХУ ім. В. Дал, sb. sciences. prac. Lugans'k: view of SNU ім .. В. Даля, №12 (154), ч. 2, 2010. - с.40 - 45.
17. Kormilitsina E.V. Photoemission spectroscopy from the GaAs surface / E.V. Kormilitsina, I.D. Chernikova - Material of the XVIII international scientific and technical. Conf., м. Северодонецьк 17 - 18 квітня 2015 р., ч. 2.- с. 81 -84.
18. Kulyshv A.M., Influence of the state of the surface of semiconductors on the work function of photodetectors. / A.M. Kulyshv, I.D. Chernikova, N.G. Chernikov - Вісник СХУ ім . В. Дал, sb. sciences. prac. Lugans'k: view of SNU ім. В. Даля, №2 (226), 2016. - с. 112 - 123.
19. Bergstresser T.K. The effect of germanium impurities on the emission properties of p-type gallium arsenide / T.K. Bergstresser, S.W. Rublof - Phys. Rev. Lett., 1973. 30, p. 794 – 79.

References

1. Lyashenko V.I. Elektronnyye yavleniya na poverkhnosti poluprovodnikov / V.I. Lyashenko, V.G. Litovchenko, I.I. Stepko, V.I. Strikha, L.V. Lyashenko – K.: Naukova dumka, 1969.–358 s.
2. Kiselev V.F. Poverkhnostnyye yavleniya v poluprovodnikakh i dielektrikakh / V.F. Kiselev – M.: Nauka, 1971.– 320 s.
3. Rzhano A.V. Elektronnyye protsessy na poverkhnosti poluprovodnikov / A.V. Rzhano – M.: Nauka, 1973. – 268 s.
4. Vol'kenshteyn F.F. Fiziko-khimiya poverkhnosti poluprovodnikov / F.F. Vol'kenshteyn – M.: Nauka, 1980.– 345 s.
5. Scheer J. The influence of cesium adsorption on surface Fermi level position in gallium arsenide / J. Scheer, J van Laar.– Surf. Sci., 1969, 18 p. 130 – 139.
6. Gobely G.Q. Photoelectric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Comparison with Si and Ge / G.Q.

Черникова И.Д., Черников Н.Г., Зубков С.Ю. Исследование энергетической структуры поверхности GaAs при покрытии германием.

В статье рассмотрено влияние адсорбированных слоев германия на поверхность монокристаллов арсенида галлия и фотоэмиссионным методом в сверхвысоком вакууме изучено влияние этих слоев на энергетический спектр кристалла.

Ключевые слова: фотоэмиссия, квантовый выход, распределение электронов по энергиям, спектральный

анализ, работа выхода, электронное сродство, загиб зон, полупроводники, полупроводниковый прибор.

Chernikova I.D., Chernikov N.G., Zubkov S.Y.
Investigation of the energy structure of the GaAs surface with germanium coating

The article discusses the effect of germanium adsorption on the surface of gallium arsenide single crystals and the photoemission method in an ultrahigh vacuum. The effect of these layers on the crystal energy spectrum is studied.

Keywords: *photoemission, quantum yield, electron energy distribution, spectral analysis, work function, electron affinity, band bending, semiconductors, semiconductor device.*

Чернікова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikova_i_d@ukr.net

Черніков Микола Григорійович – к.фіз-мат.н., доцент, доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
chernikov_n_g@ukr.net

Зубков Станіслав Юрійович – студент групи ГМ-16Да факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк)
stasimaru@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 18.02.2019.

УДК 535.247.4:535.243

ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЇ БАРІУ НА ПОВЕРХНЮ АРСЕНІДУ ГАЛІЮ ФОТОЕМІСІЙНИМ МЕТОДОМ

Черніков М.Г., Чернікова І.Д., Алієв В.Е.

THE STUDY OF THE ADSORPTION OF BARIUM ON THE SURFACE OF GALLIUM ARSENIDE PHOTOEMISSION METHOD

Chernikov N., Chernikova I., Alieff V.

Відомо, що час від часу встановлені розділи науки переживають періоди стрибкоподібного розвитку, обумовлені появою якісно нових ідей, приладів і методів вимірювань. Наочний приклад тому – оптична спектроскопія, яка з появою лазерних джерел світла значно змінилася. Поряд з інтенсивним розвитком класичних напрямків виникли принципово нові методи та програми. Серед нових напрямків особливе місце займає статистичний і спектральний аналіз світлових полів за допомогою фотодетекторів – спектроскопія оптичного змішання. Експериментальні методи спектроскопії оптичного змішання, зокрема дослідження за статистикою фотозвітів, викликали перед експериментаторами певні вимоги до ефективності фотодетекторів. У даній роботі розглядаються методи і способи отримання ефективних фотодетекторів за допомогою фотоemisії.

Ключові слова: фотоemisія, квантовий вихід, розподіл електронів по енергіях, спектральний аналіз, робота виходу, електронна спорідненість, загин зон, напівпровідник, напівпровідниковий прилад.

Аналіз останніх досліджень та публікацій: Як вперше було показано в роботах [1, 2] на поверхні монокристала можлива поява поверхневих станів, енергії яких лежать в забороненій зоні. Ці стани обумовлені розривом зв'язків на поверхні кристалів. В роботі [3] встановлено, що при великій щільності поверхневих станів на вільній поверхні напівпровідника відбувається зміна енергетичного спектра електронів внаслідок загину зон. Загин зон обумовлений наявністю подвійного електричного шару поблизу поверхні, який утворений зарядами в поверхневих станах і просторовим зарядом протилежного знака, що поширюються вглиб кристала.

Глибина поширення подвійного шару визначається ступенем легування напівпровідника. Наявність подвійного шару обумовлює збільшення або зменшення потенційної енергії електронів на поверхні на величину Φ_0 (рис. 1)

Становище рівня Фермі в об'ємі залежить від ступеня легування, в той час як його становище щодо краю валентної зони E_V і зони провідності E_C на поверхні повністю визначається щільністю поверхневих станів. Таким чином, відбувається стабілізація рівня Фермі на поверхні.

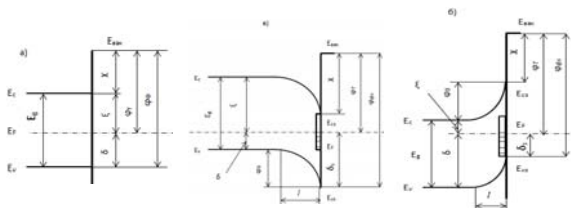


Рис. 1. Схема енергетичних спектрів поверхні напів-провідника: а – власний напівпровідник з малою щільністю поверхневих станів; б – електронний напівпровідник; в – дірковий напівпровідник; б – і в – для випадку великої щільності поверхневих станів

Внаслідок стабілізації рівня Фермі на поверхні термоелектронна робота виходу істотно залежить від загибу зон. Вона визначається як енергія (рис. 1а), яку потрібно передати електрону, щоб перевести його з рівня Фермі в вакуум:

$$\Phi_T = E_{\text{вак}} - E_F = \chi + (E_C + E_F) = \chi + \xi \quad (1)$$

Робота виходу Φ_T може бути визначена (рис. 1б – для напівпровідника n-типу; рис. 1в – для напівпровідника p-типу) фотоemisійним методом. Для цього необхідно провести фотоemisійні вимірювання металу і напівпровідника в одному і тому ж приладі і при одних і тих же вакуумних умовах.

Електронна спорідненість не залежить від загибу зон.

$$\chi = (E_{\text{вак}} - E_C)_s \quad (2)$$

Фотоелектронна робота виходу для збуджених з валентної зони біля самої поверхні електронів

$$\Phi_{\text{фс}} = (E_{\text{вак}} - E_v) \quad (3)$$

також не залежить від загину зон. Для електронів, порушених з глибини напівпровідника, фотоелектронна робота виходу залежить від загину зон і визначається як величиною загину зон, так і глибиною виходу фотоелектронів.

У фотоелектронній спектроскопії розглядаються два види аналізу експериментальних результатів: спектральний розподіл квантового виходу фотоелектронів і розподіл по енергіях емітованих фотоелектронів.

Вплив поверхневих станів на спектральний розподіл квантового виходу фотоемісії інтерпретується різними авторами по-різному: Шеєр і Лаар [4] пояснюють її як результат порушення електронів з поверхневих станів, Гобелі і Аллен [5] – збудженням електронів з верхніх рівнів валентної зони з одночасним обміном нормальної складової імпульсу електрона з поверхнею. Лінійна залежність пояснюється авторами в обох випадках прямими переходами електронів з валентної зони. Фішер [6] передбачає, що як кубічна так і лінійна залежність спектрального розподілу $Y(h\nu)$ обумовлені однаковими механізмами збудження: а саме, прямими переходами в об'ємі, але кубічна залежність обумовлена ще й впливом на фотоемісію загину зон.

Раніше Редфілд [7], розглядаючи фотоемісії з напівпровідників при наявності загину зон на поверхні, прийшов до наступних висновків: 1) хвіст спектрального розподілу квантового виходу простягається за область нормального порога фотоемісії; 2) положення кордону валентної зони не може бути визначено з спостережуваного порога; 3) області позитивного і негативного просторового зарядів викликають ефекти, які можуть бути несиметричні; 4) залежності квантового виходу $Y(h\nu)$ поблизу порога фотоемісії істотно не відрізняються як при $n = 3/2$, так і при $n = 5/2$ у формулі

$$Y = C_n (h\nu - hv_0)^n \quad (4)$$

де C_n і n – коефіцієнти, що залежать від механізмів збудження фотоемісії; hv_0 – енергія фотона, що відповідає порогу фотоемісії.

Експериментально отримані залежності $Y(h\nu)$ в області поблизу порога фотоемісії для ряду напівпровідників [6] мають вигляд, подібний показаному на рис.2. для арсеніду галію.

У безпосередній близькості від порога хід кривої слід співвідношенню:

$$Y(h\nu) \sim (h\nu - hv_0)^3, \quad (5)$$

а потім в деякому інтервалі $h\nu$ має місце лінійна залежність:

$$Y(h\nu) \sim (h\nu - hv_0)^1 \quad (6)$$

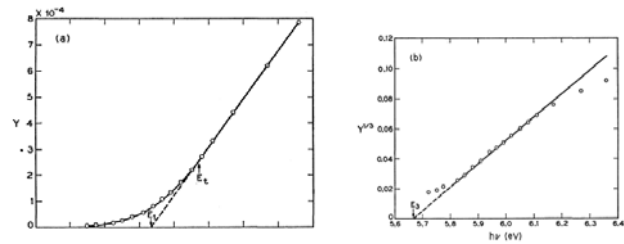


Рис. 2. Спектральний розподіл квантового виходу фотоелектронів з поверхні відколу (110) GaAs[6] :

а – E_1 – лінійна залежність; б – кубічна залежність;

E_3 – екстрапольоване значення порога фотоемісії з поверхні

Розподілу по енергіях емітованих фотоелектронів певною мірою відображає особливості енергетичної структури речовини. З таких розподілів, виміряних при різних енергіях (рис. 3), що збуджують емісію фотонів, можна отримати інформацію про характер міжзонних переходів, їх початкових і кінцевих станів і про вплив на них умов на поверхні. Для цього використовується метод обробки експериментальних даних, запропонованих Фішером [6].

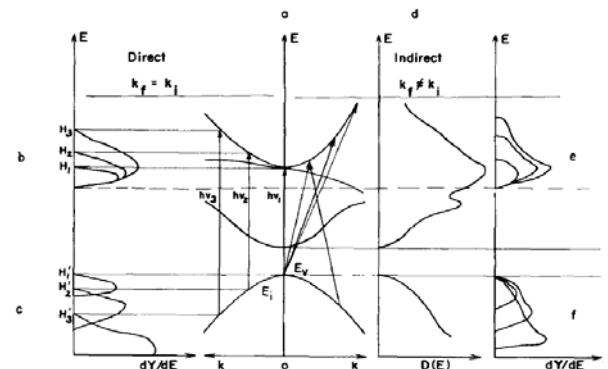


Рис. 3. Прямі і непрямі переходи в твердому тілі:

а – схематичне зображення зонної структури $E(k)$ напівпровідника; б – розподіл фотоелектронів в разі прямих переходів; в – розподілу фотоелектронів в разі врахування з максимальною енергією H енергії фотона $h\nu$, щоб показати початковий стану переходів; д – щільність станів електронів в кристалі; е – енергетичні розподілу фотоелектронів в разі непрямих переходів; ф – переміщені розподіли енергії $(E - hv)$ підкреслюють початковий стан, як в (с)

На рис. 3 схематично представлена зонна структура твердого тіла. Припустимо, що мають місце прямі переходи при енергіях фотонів $h\nu_1$, $h\nu_2$ і $h\nu_3$ та перехід з вершини валентної зони в зону провідності відбувається при енергії фотона $h\nu_1$. При значенні $h\nu_1$ максимальна енергія емітованих електронів визначається величиною $(E_v - h\nu_1)$. Цей високоенергетичний край розподілу по енергіях позначений на рис. 3. буквою H_1 . Якщо тепер змістити вимірний розподіл в сторону низьких енергій на величину $h\nu_1$, то шкала E енергій дає початкові, а не кінцеві енергії, і верх валентної зони, тобто H'_1 , як показано на рис. 3. При енергіях фотонів $h\nu_1$, $h\nu_2$ і $h\nu_3$, причому $h\nu_3 > h\nu_2 > h\nu_1$ переходи з верхнього рівня валентної зони неможливі і зміщені високое-

нергетичні краї енергетичних розподілів H'_1 , H'_2 і H'_3 не будуть збігатися з верхом валентної зони, але визначатимуть стани E_{i2} і E_{i3} , з яких електрони збуджуються фотонами з енергіями $h\nu_2$ і $h\nu_3$. Енергії E_{i2} і E_{i3} визначаються відповідно співвідношеннями:

$$H'_1 - H'_2 = E_v - E_{i2}; \quad H'_1 - H'_3 = E_v - E_{i3} \quad (7)$$

Таким чином, ми можемо знайти прямі переходи і їх початкові і кінцеві стани.

Поверхневий бар'єр на поверхні дуже сильно залежить від стану поверхні і від того, яким способом вона приготовлена. Фішером [6] був запропонований метод визначення загину зон ϕ_0 і електронної спорідненості χ з аналізу енергетичних розподілів. Їм було показано, що більш зручними для вивчення поверхневих властивостей є напівпровідники n-типу провідності. Як видно з рис. 1, б для напівпровідника n-типу зони загнуто вгору і електрони в поверхневих станах мають більшу енергію, ніж електрони валентної зони в об'ємі і валентної зони на поверхні. При порушенні монохроматичним світлом з енергією $h\nu$ емітовані електрони будуть розділені на три групи з різними енергіями. Це дозволяє за допомогою енергетичного розподілу безпосередньо вимірювати як зміни в загині зон так і в зміні електронної спорідненості. В цьому випадку розглядають два краю в розподілі фотоелектронів по енергіях: низькоенергетичних та високоенергетичних (рис. 4).

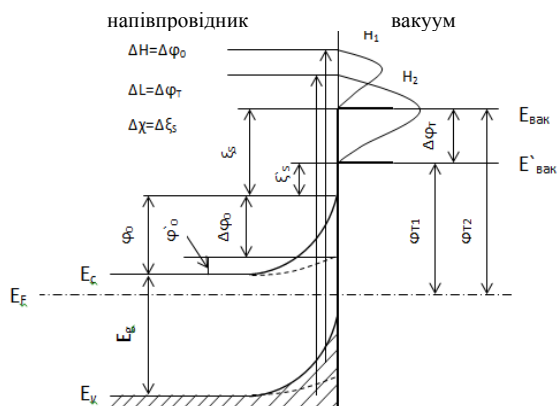


Рис. 4. Енергетичний спектр поверхні напівпровідника: H – високоенергетичний край розподілу фотоелектронів; L – низькоенергетичний край розподілу фотоелектронів

Високоенергетичний край H пов'язаний з положенням зон щодо рівня Фермі E_F , а низькоенергетичний край L роботою виходу ϕ_T . Зміна стану на поверхні призводить до зміни в загині зон і роботі виходу. Обидва ці зміни безпосередньо вимірюються:

$$\Delta H = \Delta(E_F - E_v)_S = \Delta\phi_0; \quad \Delta L = \Delta\phi_T \quad (8)$$

Параметри енергетичної структури поверхні напівпровідника можна визначити, якщо відомі фо-

тоелектронна робота виходу на поверхні $\phi_{\phi S} = h\nu_0$ і термоелектронна робота виходу ϕ_T .

Тоді положення рівня Фермі на поверхні визначається різницею:

$$(E_F - E_v)_S = h\nu_0 - \phi_T \quad (9)$$

а електронна спорідненість обчислюється за формулою:

$$(E_{\text{вак}} - E_c)_S = h\nu_0 - E_g \quad (10)$$

Так як положення рівня Фермі E_F в об'ємі значимо, знаючи концентрацію носіїв струму, то наявні дані дозволяють розрахувати всю енергетичну діаграму поверхні напівпровідників.

І на закінчення можна відзначити, що деякі відомості можна отримати про щільність поверхневих станів з обчислення повного об'ємного заряду. Він повинен бути рівний негативному поверхневому заряду σ , який визначається за формулою Шотки:

$$\sigma = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \phi (N_D - N_A) / 2\pi} \quad (11)$$

где ϵ – статична діелектрична постійна, ϕ – загальний загин зон, який дорівнює $(E_v - E_{vS})$, N_D – концентрація донорів в напівпровіднику, N_A – концентрація акцепторів; e – заряд електрона.

Мета статті: Розглянуто метод фотоемісії для дослідження: 1) спектрального розподілу квантового виходу фотоемісії $Y(h\nu)$ і 2) енергетичного розподілу фотоелектронів $N(E)$, при аналізі експериментальних результатів монокристалів GaAs n-типу з концентрацією носіїв струму від $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $1.05 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для з'ясування впливу стану на поверхні на енергетичні параметри цієї поверхні.

Постановка завдання: Дослідження проводилися в нанометричному надвисоковакуумному фотоелектронному спектрометрі [8] на поверхні зразків GaAs n-типу, фізичні параметри яких представлені:

- концентрації носіїв струму відповідно для кожного зразка: $1 \cdot 10^{16} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,24 \cdot 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,31 \cdot 10^{18} \text{ (см}^{-3}\text{)}$, $1,05 \cdot 10^{19} \text{ (см}^{-3}\text{)}$;
- рухливості зразків відповідно: $4350 \text{ (см}^2\text{/В}\cdot\text{с)}$, $4000 \text{ (см}^2\text{/В}\cdot\text{с)}$, $3200 \text{ (см}^2\text{/В}\cdot\text{с)}$, $2100 \text{ (см}^2\text{/В}\cdot\text{с)}$;
- питомі опору: $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}$, $1,24 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}$, $1,47 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}$, $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом}\cdot\text{см)}$.

Орієнтація площин контролювалася рентгеноструктурним методом, і відхилення від зазначеного напрямку не перевищувало $\pm 3^\circ$. У кожного з чотирьох (1n ÷ 4n) досліджених зразків площині шліфувалися і хімічно полірувалися. Всі дослідження були проведені в однакових вакуумних умовах ($p = 2 \cdot 10^{-9}$ Торр), отримані результати для всіх зразків можна було порівняти між собою. Виміри проводилися абсолютно при однакових умовах для всіх зразків

Результати дослідження:

1. Спектральний розподіл квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$

Спектральні розподіли квантового виходу фотоemisії в напівлогарифмічному масштабі показані на рис. 5. Вимірювання проведені в області енергій фотонів від 4,0 еВ до 5,38 еВ. Величини квантового виходу $Y(h\nu)$ в області енергій фотонів $4,80 \text{ eV} \leq h\nu \leq 5,38 \text{ eV}$ у досліджених зразків мало відрізняються і приймають від $1,69 \cdot 10^{-4}$ до $7,2 \cdot 10^{-4}$ електрон / квант для зразків від 1n до 4n, концентрація носіїв яких варіювала від $2 \cdot 10^{16}$ до $1,05 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ відповідно. Таким чином, квантовий вихід зростає приблизно в 1,6 рази, в той час як концентрація носіїв струму зростала на три порядки.

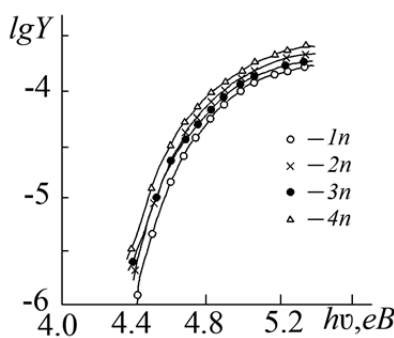


Рис. 5. Спектральні розподіли квантового виходу фотоemisії для зразків GaAs с різною концентрацією носіїв струму

Розкид величини квантового виходу фотоemisії $Y(h\nu)$, отриманий повторними вимірами в однакових вакуумних умовах, не перевищував 1%.

Вид кривих спектрального розподілу квантового виходу (рис. 5) по всій області спектра для всіх зразків практично збігається. В області енергій фотонів $h\nu$ поблизу кордону фотоemisії квантовий вихід зростає швидше, ніж в області енергій квантів $h\nu > 4,8 \text{ eV}$. На кривих спектрального розподілу не спостерігається помітної структури.

На рис. 6 представлені залежності квантового виходу Y від $h\nu$. Як видно (мал. 6,а), в області енергій фотонів $4,7 \leq h\nu \leq 5,3 \text{ eV}$ спостерігається лінійна залежність Y від $h\nu$. В області енергій $h\nu \geq 5,3 \text{ eV}$ спостерігається відхилення квантового виходу від лінійної залежності в бік менших значень енергій, а в області енергій $h\nu \leq 4,7 \text{ eV}$ – в сторону більших

значень. Хід залежності квантового виходу при енергії $h\nu \leq 4,7 \text{ eV}$ підпорядковується кубічному закону (рис. 6,б) і екстраполяція кривих фотоелектричного порога, тобто значення спектрального розподілу квантового виходу у цій області дозволяє визначити значення фотоелектронної роботи виходу $\phi_{\text{ф}}$. Ці залежності добре узгоджуються з даними робіт [5, 6].

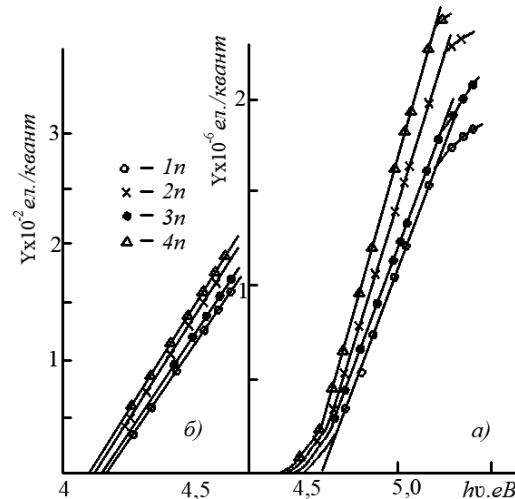


Рис. 6. Спектральні розподіли квантового виходу фотоemisії: а – лінійна залежність; б – кубічна залежність

Знайдені таким чином значення порога фотоemisії для всіх зразків наведені в таблиці 1 (стовпець 6). Видно, що поріг фотоemisії залежить від концентрації носіїв струму, зменшуючись зі збільшенням останньої, що добре узгоджується з даними, отриманими іншими авторами.

Екстраполяція прямолінійного ділянки на кривих спектрального розподілу дає значення порогів енергій $h\nu'_0$ для прямих переходів. Ці значення наведені в стовпці 7. Відзначимо, що також зменшується від зразка 1n до зразка 4n.

Положення рівня Фермі в обсязі наведені в стовпці 3, а положення рівня Фермі на поверхні зразків (стовпець 8) визначалося за формулою (9) за допомогою наведених в таблиці даних для порога фотоemisії (стовпець 6) і термоелектронної роботи виходу (стовпець 5).

Таблиця 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ п/п	n, cm^{-3}	$(E_F - E_v)_v$, eV	E_g , eV	$\phi_{\text{т}}$, eV	$h\nu_0$, eV	$h\nu'_0$, eV	$(E_F - E_v)_s$, eV	χ , eV	ϕ_0 , eV
1n	$1,30 \cdot 10^{16}$	1,32	1,40	4,07	4,26	4,64	0,19	2,86	1,13
2n	$1,24 \cdot 10^{17}$	1,37	1,40	4,04	4,24	4,60	0,20	2,84	1,17
3n	$1,31 \cdot 10^{18}$	1,43	1,40	4,02	4,20	4,58	0,18	2,80	1,25
4n	$1,05 \cdot 10^{19}$	1,48	1,40	3,99	4,18	4,56	0,19	2,78	1,29

Термоелектронна робота виходу визначалася за формулою $\Phi_T = \Phi_K - eV_K$ для зразків GaAs. Для цього проводилися вимірювання розподілу фотоелектронів по енергіях з поверхні срібла (Ag), а потім визначали роботу виходу колектора спектрометра. Результати експериментальних вимірювань дали значення роботи виходу: для срібла $\Phi_{Ag} = 4,27 \pm 0,01$ eV; для колектора фото спектрометра $\Phi_K = 4,43 \pm 0,01$ eV. За цим значенням роботи виходу визначили спорідненість до електрону χ (формула 10) і загин зон Φ_0 (формула 8).

Електронна спорідненість (стовпець 9) і термоелектронна робота виходу (стовпець 5) зменшуються зі збільшенням концентрації носіїв струму, в той час як положення рівня Фермі на поверхні зразків GaAs (стовпець 8) для всіх зразків було практично однаково. Залежність термоелектронної роботи виходу Φ_T від концентрації носіїв струму n добре узгоджується з результатами, отриманими іншими авторами [9]. Зміна ж спорідненості до електрону χ зі збільшенням концентрації носіїв струму для зразків n -типу провідності, наскільки нам відомо, виявлено вперше і дозволяє припустити, що при великій концентрації легуючої домішки в GaAs n -типу відбувається або зміна енергетичного спектра, який визначає електронне спорідненість, або відбуваються зміна на поверхні напівпровідника, внаслідок легуючої домішки. Зміна спектра електронів при зміні концентрації легуючої домішки для зразків GaAs n -типу дійсно спостерігалось при вивченні оптичного спектру відображення.[10].

Величина $(E_F - E_V)_S$ (табл 1) не залежить від концентрації носіїв струму n і має мале значення. Останнє вказує на те, що у зразків GaAs на поверхні існує загин зон. Величина (стовпець 10) при збільшенні концентрації носіїв струму зростає Велике значення загину зон, мабуть, пояснюється наявністю на поверхні напівпровідника великої щільності поверхневих станів в забороненій зоні. Значна щільність поверхневих станів може бути обумовлена запаленням вільних поверхневих станів електронами чужорідних атомів при травленні поверхні. Обробкою поверхні травленням можна значно змінювати загин зон, внаслідок чого змінюються фізичні властивості напівпровідника в області просторового заряду.

2. Розподіл електронів по енергіях $dY/dE(h\nu)$.

Енергетичні розподіли фотоелектронів вивчалися для всіх зразків при різних енергіях фотонів $h\nu$. Результати таких вимірів, як приклад для зразка $1n$, наведені на рис. 7. По осі абсцис, поряд з енергією електронів, відкладені значення потенціалу V_0 , що затримує фотоелектрони. По осі ординат відкладено число фотоелектронів, які вийшли на один квант в інтервалі енергій 1eV. Видно, що величина потенціалу V_S , тобто контактна різниця. потенціалів між емітером і колектором V_K не змінюється зі зміною енергії фотонів, звідки випливає, що Φ_T не залежить від енергії фотонів, що

збуджують фотоемісію. Величина V_0 зі зміною енергії фотонів змінюється, що вказує на зміну величини енергетичної відстані від рівня Фермі до того рівня, з якого відбувається збудження фотоелектронів.

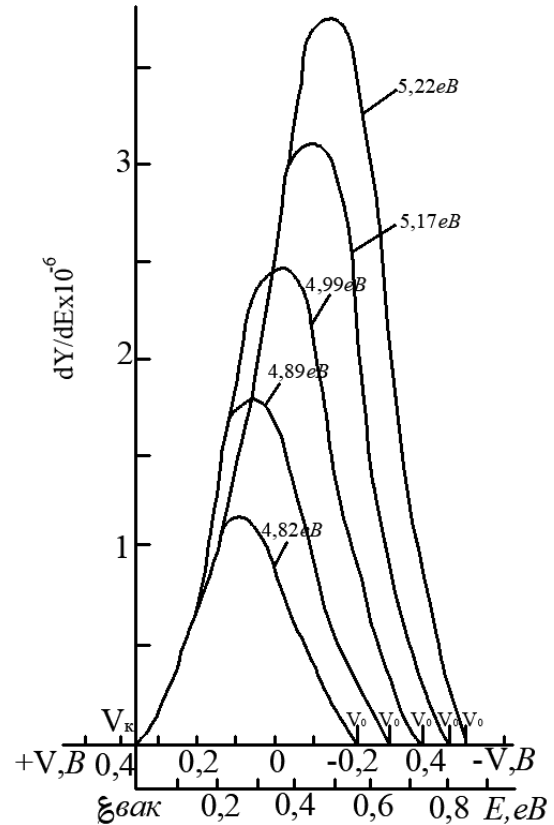


Рис. 7. Розподіл фотоелектронів по енергіях для зразка $1n$ при різних значеннях фотонів $h\nu$. На осі абсцис (верхня шкала) вказані значення потенціалу V_0 , що затримує та потенціалу V_K насичення на нижній шкалі вказана енергія (початок відліку енергії від рівня вакууму)

З рисунка 7 також випливає, що зі збільшенням енергії фотонів збільшується фотоелектронна робота виходу, слідуючи лінійному закону. Це показує, що рівняння Ейрштейна має бути записано у вигляді:

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \phi_\Phi(h\nu)$$

Подібна залежність фотоелектронної роботи виходу була отримана Векслером і Соколовим при розгляді фотоемісії в багатоелектронному наближенні [12]. Автори дали нову інтерпретацію співвідношення Ейнштейна, згідно з якою поглинання фотонів приводить до збудження не одного електрона, а всієї системи електронів, і показали, що при обліку взаємодії між електронами робота виходу лінійно збільшується зі збільшенням частоти світла, тобто стає функцією від енергії фотонів.

Таблиця 2

№ п/п	hv = 4,68 eB			hv = 4,82 eB			hv = 4,89 yB			hv = 4,99 eB			hv = 5,15 eB			hv = 5,22 eB		
	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)	V _к (B)	V ₀ (B)	φ _ф (eB)
1n	0,37	0,1	4,21	0,37	0,22	4,23	0,37	0,27	4,25	0,37	0,35	4,27	0,37	0,51	4,28	0,37	0,55	4,30
2n	0,40	0,1	4,18	0,40	0,22	4,220	0,40	0,28	4,21	0,40	0,36	4,23	0,40	0,51	4,25	0,40	0,56	4,26
3n	0,42	0,1	4,16	0,42	0,22	4,18	0,42	0,28	4,19	0,42	0,37	4,20	0,42	0,50	4,24	0,42	0,55	4,25
4n	0,45	0,1	4,13	0,45	0,22	4,15	0,45	0,27	4,17	0,45	0,36	4,18	0,45	0,50	4,21	0,45	0,56	4,22

Значення φ_ф, а також V_к і V₀ для розглянутих зразків наведені в табл 2, з якої випливає, що для всіх зразків при однакових значеннях енергії фотонів hv потенціал V₀ однаковий. Це показує, що у всіх зразках фотоелектрони збуджуються з однакових станів. Величина V_к з збільшенням концентрації носіїв струму зростає при однакових енергіях фотонів hv, що свідчить про зменшення фотоелектронної роботи виходу φ_ф з ростом концентрації.

У розподілі фотоелектронів по енергіях спостерігається один максимум, який зі збільшенням енергії фотонів зміщується з енергетичної шкалою так, що ΔE_{max} ≠ hv (рис. 7). Це підтверджує, що спостережуваний максимум обумовлений прямим переходом електронів з валентної зони в зону провідності. Аналіз кривих енергетичних розподілів показує, що перехід з енергією 4,6 eB відбувається з валентної зони поблизу Г точки в напрямку Σ.

Величина отриманого переходу добре узгоджується з подібним переходом, виявленим при теоретичному розрахунку зонної структури GaAs.

3. Вплив підсвічування на фотоемісії з арсеніду галія.

Підсвічування здійснювалася від лампи розжарювання як світлом, не розкладеним по спектру, так і променем світла, який пройшов через світлофільтр КС-18. Інтенсивність світла підсвічування змінювалася за допомогою нейтральних світлофільтрів. При підсвічуванні вимірювалися як спектральний розподіл квантового виходу фотоемісії, так і енергетичні розподіли фотоелектронів. Як показали результати експерименту, при підсвічуванні відбувається збільшення квантового виходу фотоемісії аж до енергії фотонів hv ≤ 4,9 eB. При енергії фотонів hv > 4,9 eB збільшення Y(hv) при підсвічуванні не спостерігалось. Ефект підсвічування наочніше проявляється не при розгляді спектрального розподілу квантового виходу Y(hv), а при розгляді вольтамперних характеристик I = f(V), де V – потенціал, що затримує фотоелектрони на колекторі сферичного аналізатору. Так як фототок насичення I_S ~ Y(hv), то проводячи вимірювання фотоструму насичення, можна з'ясувати причину зазначеного збільшення при підсвічуванні.

Експеримент показав, що при підсвічуванні збільшується фототок насичення I_S і спостерігається зміщення вольтамперних характеристик в сторону збільшення потенціалу V_к, тобто контактна різниця потенціалів між емітером і колектором зростає. Збільшення фотоструму насичення ΔI_S = I_S – I_{Sn} а також величини зсуву ΔV_к залежать від енергії фотонів hv, що збуджують фотоемісії. Зі збільшенням енергії фотонів hv значення ΔI_S і ΔV_к уменьшаються. Залежність відносного збільшення фотоструму насичення ξ = ΔI_S/I_S = (I_S – I_{Sn})/I_S при підсвічуванні від енергії фотонів hv показана на рис. 8а. Величина відносного збільшення ΔI_S/I_S фотоструму насичення з збільшенням енергії фотонів зменшується. Максимальне збільшення спостерігається при порозі фотоемісії hv₀. Значення відносного збільшення фотоструму залежало від концентрації носіїв струму і було тим більше, чим менше концентрація, досягаючи у зразка 1n величини ~ 75%.

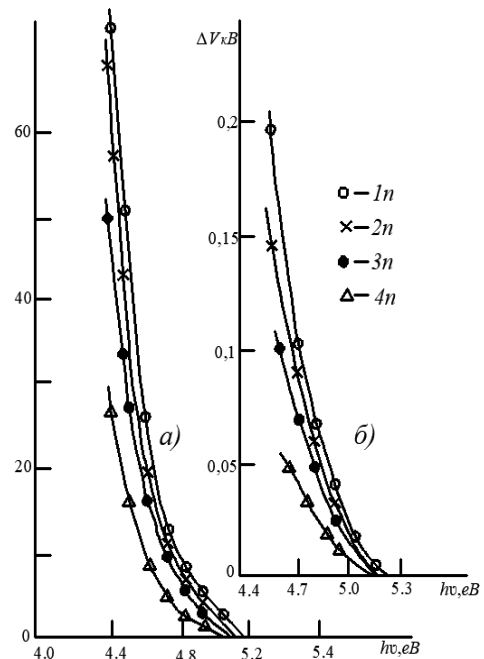


Рис. 8. а – Залежність відносного збільшення фотоструму насичення від енергії фотонів, що викликають фотоемісії; б – залежність зміщення потенціалу насичення від енергії фотонів

Така значне зміна фотоструму вказує на можливість його *модуляції підсвічуванням*, що може знайти *практичне застосування в роботі фотокатодів при вивченні світлових полів*.

Залежність зміщення вольтамперних характеристик при підсвічуванні ΔV_K від енергії фотонів $h\nu$ для вивчених зразків представлена на рис. 8, б. Як видно, величина ΔV_K для зразка 4n була невеликою і для визначення її значення проводилися багаторазові повторні вимірювання. Але хід залежності ΔV_K у всіх зразків від енергії фотонів $h\nu$ мав однаковий характер.

Зсув потенціалу ΔV_K обумовлено збільшенням контактної різниці потенціалів. Збільшення останньої вказує на зменшення термоелектронної роботи виходу Φ_T . Зміна термоелектронної роботи виходу Φ_T може бути викликана або зміною електронної спорідненості $\Delta\chi$ на поверхні GaAs, або зміною загину зон $\Delta\Phi_0$, або зміною однієї величини і інший одночасно.

Для з'ясування причини зменшення термоелектронної роботи виходу Φ_T розглянемо енергетичні розподіли фотоелектронів $N(E)$ при підсвічуванні і без неї (рис. 9). Видно, що при підсвічуванні зміщуються як високоенергетичні края розподілу H'_1 , так і низькоенергетичні края L' і величини зміщення однакові, тобто $\Delta H'_1 = \Delta L'_1$ і становить 0,1eV. Як зазначено вище (рис. 4), величина ΔH відповідає зміні загину зон $\Delta\Phi_0$, а величина ΔL – зміні термоелектронної роботи виходу $\Delta\Phi_T$. Таким чином, в нашому випадку зміна роботи виходу обумовлено тільки зміною загину зон. Тобто, при впливі підсвічування на фотоemisію з напівпровідників відбувається зміна термоелектронної роботи виходу тільки внаслідок зміни загину зон $\Delta\Phi_0$.

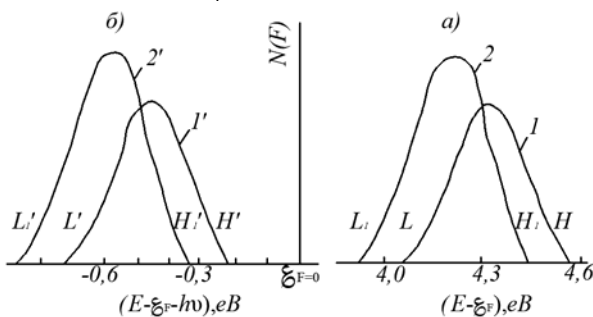


Рис. 9. Енергетичні розподіли фотоелектронів для зразка 1n при eV; а – распределения фотоелектронів, що вийшли в вакуум; б – зміщені енергетичні розподіли навелічину енергії фотона. Криві:

1. – без підсвічування; 2. – з підсвічуванням

Зміна загину зон $\Delta\Phi_0$ не викликає зміни у фотоелектронній роботі виходу Φ_f для електронів, порушуваних у самій поверхні (рис. 4), але зменшує її для фотоелектронів, порушуваних в об'ємі. Максимальне зменшення буде для електронів

порушуваних на глибині, порівнянної з областю зміни загину зон.

Об'ємний характер фотоemisію пояснює спостережувану при підсвічуванні залежність збільшення фотоструму насичення I_S і та зміщення потенціалу затримки V_K фотоелектронів від енергії $h\nu$ збуджуючих фотоemisію фотонів. Ці залежності обсловлені коефіцієнтом оптичного поглинання, який збільшується зі збільшенням енергії фотонів [11]. Чим більше коефіцієнт оптичного поглинання α , тим менше глибина l , з котрої відбувається збудження фотоелектронів ($l = 1/\alpha$), і тим менше збільшення фотоструму насичення ΔI_S при підсвічуванні.

4. Фотоemisію з GaAs при адсорбції барію.

Для з'ясування впливу адсорбції барію на фотоemisію з арсеніду галію, проведені виміри як спектрального розподілу квантового виходу $Y(h\nu)$, так і розподілу фотоелектронів по енергіях $N(E)$. Порівняння цих результатів вимірювань з результатами вимірів для зразків без покриття барієм, дозволило з'ясувати вплив покриття на зміни енергетичних параметрів поверхні арсеніду галію і його структури зон в об'ємі і в приповерхневому шарі.

Для кожного зразка проведені вимірювання спектрального розподілу квантового виходу фотоелектронів при різних ступенях покриття θ в інтервалі $0 \leq \theta \leq 1$. Ступінь покриття для зразків визначали за часом напilenня. Градування джерела напilenня проводилася за методом Толланського. Моношар покриття визначали по мінімуму фотоелектронної роботи виходу $h\nu_0$ (рис. 10).

Залежність порога фотоemisію $h\nu_0$ від ступеня покриття θ для всіх досліджених зразків майже однакова. Мінімум знаходиться в межах $2,3 \div 2,4$ eV; при подальшому зростанні ступеня покриття поріг фотоemisію зростає і досягає 2,52 eV (робота виходу Φ_a) [10].

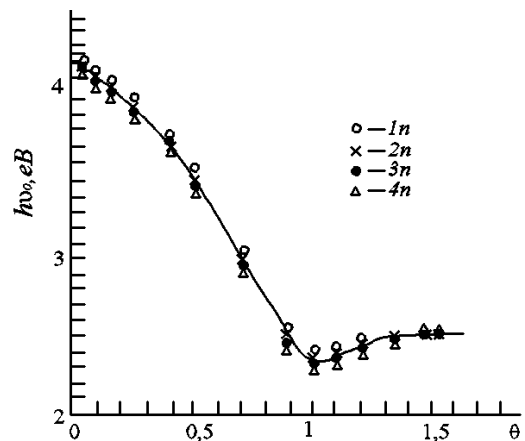


Рис. 10. Залежність порога фотоemisію від ступеня покриття. Точки на кривій відповідають значенням порога фотоemisію для зазначених зразків. Мінімум порога відповідає ступеню покриття одного моношару

Зміни, що спостерігаються в залежності $Y^{1/3}(h\nu)$ від ступеня покриття θ (рис. 11) добре узгоджуються з даними по відношенню збільшенню квантового виходу $\Delta Y/Y$ від ступеня покриття θ [9].

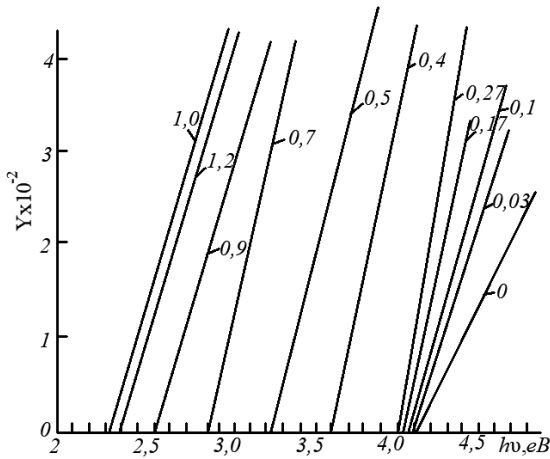


Рис. 11. Кубічна залежність спектрального розподілу квантового виходу фотоемісії для зразка 3n при покритті його поверхні Ва. Ступінь покриття вказана на рисунку

Можливо, що незначне зменшення порогу фотоемісії $h\nu_0$ і збільшення $\Delta Y/Y$ при $\theta \leq 0,3$ обумовлено особливостями адсорбції Ва на поверхні GaAs. При малих кількостях адсорбованих атомів Ва на поверхні GaAs валентні електрони барію, заповнюючи поверхневі стану підкладки напівпровідника викликають утворення подвійного шару заряду на поверхні і в силу цього поверхня стає більш електропозитивною, що призводить до зміни загину зон і зміщення рівня Фермі до вершини валентної зони. При цьому відбувається його стабілізація на поверхні [4].

При більш значних ступенях покриття θ , зменшення порогу фотоемісії $h\nu_0$ обумовлено зменшенням спорідненості до електрону χ . Це призводить до збільшення ймовірності виходу електронів з меншою роботою виходу за межі емітера і більш значного зростання $\Delta Y/Y$ для фотоелектронів, порушених з меншими значеннями енергії фотонів $h\nu$.

Для більш глибокого з'ясування цього питання звернемося до розгляду розподілу фотоелектронів по енергії $N(E)$. Вивчення розподілу електронів по енергії $N(E)$ для зразків GaAs проводилося: а) – при різних ступенях покриття Ва для певних значень енергії фотонів $h\nu$; б) – при різних енергіях фотонів для певної міри покриття (значення енергії фотонів в цьому випадку були обрані: 5,17eV, 4,99eV, і 4,68eV., так як ці лінії спектра ртутної лампи досить інтенсивні).

Залежності розподілів фотоелектронів від ступеня покриття представлені на рис. 12. При відліку по шкалі енергій враховувалося зміна загину зон, викликана впливом покриття барієм. Тому криві представлені з поправкою на загиб зон. Зіставлення кривих на рис. 12,а і 12,б показує, що при збіль-

шенні ступеня покриття зменшується фотоелектронна робота виходу і в енергетичних розподілах, поряд з максимумом, наявними в розподілі для непокритого зразка, з'являються додаткові максимуми в області менших енергій (рис. 12,б). Так на кривій 2, знятої при енергії фотонів 4,98 eV поряд з максимумом 4,4 eV, з'являються максимуми з енергіями 4,6 eV, 4,8 eV і 3,2 eV. Аналіз цих розподілів показав, що $\Delta E_{max} \neq \Delta h\nu$. При зниженні порога фотоемісії з'являється можливість досліджувати зонну структуру напівпровідника в більш широкому інтервалі енергій. При цьому в енергетичних розподілах фотоелектронів частка повільних електронів зростає. Так при порівнянні кривих 4 на рис. 12,а та рис. 12,б видно, що при зменшенні порогу основний внесок в фотоемісію дають повільні електрони.

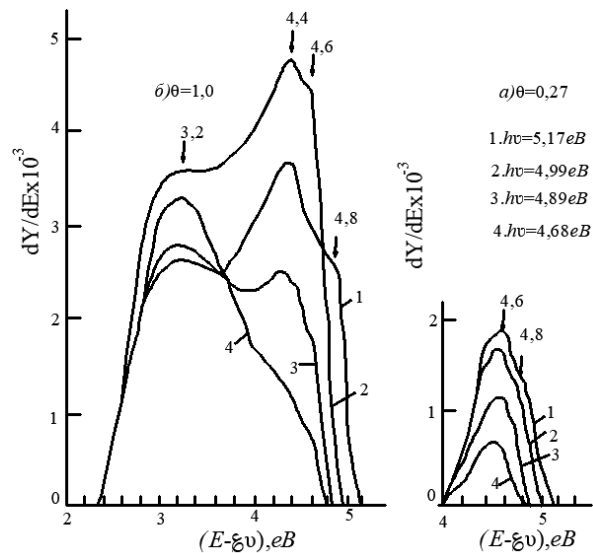


Рис. 12. Розподіл фотоелектронів по енергіях для зразка 1n при покритті барієм: а – $\theta = 0,27$; б – $\theta = 1,0$

Представлені на рис. 12 дані показують, що структура, яка спостерігається до адсорбції Ва, зберігається, але, крім того, з'являється додаткова структура; піки зміщуються зі зміною енергії фотонів, і при цьому змінюється і їх інтенсивність. Це дозволяє зробити висновок про те, що адсорбовані атоми Ва не змінюють об'ємну структуру зон GaAs, а дають можливість вивчити структуру зон в більш широкому інтервалі енергій. Спостережувані оптичні переходи є прямими і їх енергії добре узгоджуються з даними інших авторів [9].

Вивчення впливу покриттів Ва на енергетичну структуру поверхні напівпровідників показало, що при малих ступенях покриття ($\theta \leq 0,30$) спостерігається зміщення високенергетического краю кривих розподілу. Величина цього зміщення досягає максимуму при покритті $\theta = 0,27$ (рис. 13). Видно, що зміщення направлено в сторону зменшення енергії (відлік енергії від рівня Фермі).

При покритті $\theta = 0,27$ спостерігається стабілізація високоенергетичного краю H і подальше зменшення роботи виходу пов'язано зі зміщенням низькоенергетичного краю L розподілів. Згідно з працею [6] зміна високоенергетичних країв в розподілі обумовлено зміною в загині зон.

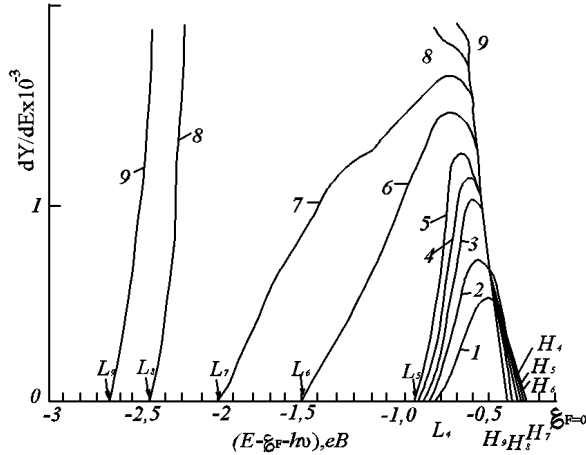


Рис. 13. Зміщені на $h\nu$ енергетичний розподіл фотоелектронів для зразка 2n ($h\nu = 4,68$ eV) при різному ступені покриття Ва; криві: 1 – $\theta = 0$; 2 – $\theta = 0,03$; 3 – $\theta = 0,1$; 4 – $\theta = 0,175$; 5 – $\theta = 0,27$; 6 – $\theta = 0,50$; 7 – $\theta = 0,7$; 8 – $\theta = 0,90$; 9 – $\theta = 1,0$;

Характер зсуву енергетичних розподілів (рис. 13) показують, що при малих ступенях покриттів (до $\theta \leq 0,30$) спостерігається зменшення загиу зон $\Delta\phi_0$. Величина цієї зміни в загині зон становила $\approx 0,2$ eV і зменшувалася зі збільшенням концентрації носіїв струму. Зміна в загині зон при великих покриттях не було помічено, і тому зміна в фотоелектронній роботі виходу $\Phi_{\text{ф}}$ (порога фотоемісії $h\nu_0$) при великих θ повністю викликана зменшенням спорідненості до електрону θ . При малих же ступенях покриття θ зміни порога фотоемісії викликані зменшенням загиу зон.

Енергетичні параметри, обчислення спектральних розподілів квантового виходу і енергетичних розподілів для досліджених зразків

при покритті їх поверхні Ва, представлені в таблиці 3 – результати наведені тільки для двох значень ($\theta = 0,27$ і $\theta = 1,0$). Як видно з представлених даних, рівень Фермі на поверхні $(E_F - E_v)_s$ у досліджених зразків стабілізується при покритті Ва при $\theta = 0,27$ моношару і подальше збільшення ступеня покриття не призводить до суттєвих змін в його становищі щодо рівня валентної зони для кожного зразка.

Спорідненість до електрону χ при оптимальному покритті становило величину $0,9 \div 1,0$ eV і зменшувалася зі збільшенням концентрації носіїв струму, завдяки чому квантовий вихід для зразків 3n і 4n був вище, ніж для зразків 1n і 2n при покриттях поверхонь Ва

При адсорбції покриттів барію загин зон ϕ_0 зменшувався, а величина зменшення загиу зон $\Delta\phi_0$, яка обумовлена цим покриттям, для досліджених зразків добре узгоджується з виявленими зміною при підсвічуванні. В обох випадках максимальна зміна значення загиу зон збігаються.

З преведених даних випливає, що при малих концентраціях атомів барію на поверхні напівпровідника відбувається зміни в області просторового заряду і величина загиу зон ϕ_0 зменшується при наявності на поверхні GaAs атомів барію з поверхневою щільністю близько $1,5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} ($\theta = 0,27$). В обох випадках максимальна зміна загиу зон $\Delta\phi_0$ збігаються.

При підвищенні ступеня покриття $\theta > 0,3$ термоелектронна робота виходу ϕ_T знижується внаслідок зменшення тільки спорідненості до електрону χ .

Положення рівня Фермі E_F на поверхні до адсорбції барію у зразків 1n, 2n, 3n, 4n було майже однаковим (табл. 1), після ж адсорбції барію спостерігалися деякі відмінності в положенні рівня Фермі відносно країв зон для зразків 1n і 2n в порівнянні з цим положенням для 3n і 4n (табл. 3) ця відмінність, можливо, зумовлено різною кристалграфічною орієнтацією граней, на яких проводилася адсорбція барію.

Таблиця 3

Параметри на поверхні GaAs	1n		2n		3n		4n	
	ступінь покриття θ							
	$\theta = 0,27$	$\theta = 1,0$	$\theta = 0,27$	$\theta = 1,0$	$\theta = 0,27$	$\theta = 1,0$	$\theta = 0,27$	$\theta = 1,0$
$h\nu_0$, (eV)	4,11	2,4	4,09	2,26	4,04	2,34	4,02	2,3
ϕ_T , (eV)	3,73	2,02	3,74	2,01	3,74	2,04	3,74	2,02
$(E_F - E_v)_s$, (eV)	0,38		0,35		0,3		0,28	
χ , (eV)	2,71	1,0	2,69	0,96	2,64	0,04	2,62	0,9
ϕ_0 , (eV)	0,91	0,91	0,99	0,99	1,07	1,07	1,12	1,12
$\Delta\phi_0$, (eV)	0,19		0,15		0,1		0,09	

Висновки. Арсенід галію є перспективним напівпровідниковим матеріалом в мікроелектроніці. Катоди, створені на основі GaAs стабільні в роботі, мають високу чутливість і вибірковістю. Подальше вивчення структурних і енергетичних параметрів кристалів GaAs значно впливає на технології виготовлення ефективних фотокатодів, нано- та мікроприладів.

Литература

1. Тамм И.Е. Собственные (т.е. не связанные дефектами) поверхностные состояния, локализованные у поверхности кристалла и свободно распространяющиеся вдоль нее / Тамм И. Е. ЖЭТФ, 1933. № 3, с. 34 – 59.
2. W. Shockly. On the Surface States Associated with Periodic Potentia. //William Shockley/ Phys. Rev, 1939, 56, p. 317 – 342.
3. J. Bardeen. Surface and Rectification at a Metal Semiconductor Contact. //John Bardeen/ Phys. Rev. 1947, 71 p. 717 – 725.
4. J. Scheer, J van Laar. The influence of cesium adsorption on surface fermi level position in gallium arsenide // J. Scheer, J van Laar / Surf. Sci., 1969, 18 p. 130–139.
5. G.Q. Gobely, F.G. Allen. Photoelektric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Surfaces; Comparison with Si and Ge. // G.Q. Gobely, F.G. Allen / Phys. Rev. 1965, 137. – A245–A249.
6. T.E Fischer. Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelekctric emission//Fischer T. E.//North-Holland Publishing Co., Fmgsterdam, Surface Science, 1969, 13 – p. 30 – 51.
7. D. Redfield. Theory for the Photoemission from a Spec-Charge region of a Semiconductor.// D.Redfield / Surf. Sci., 1969. 124 p. 1809 – 1820.
8. Волошин М.А., Удовиченко С.О., Черникова И.Д. и др. Сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхностных свойств твердых тел // М.А. Волошин, С.О. Удовиченко, И.Д. Черникова, Н.Г. Черников / Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації, 2011.– №2(24). с. 14-19.
9. Бова А.Р., др. Влияние структурных изменений на поверхности на энергетический спектр электронов в арсениде галлия / А.Р. Бова, М.А. Волошин, О.Б. Лагиш, И.Д. Черникова, Н.Г. Черников // Вісник СХУ ім. В. Даля, 2010. – № 12 (154), ч. 2. – с. 10 – 15.
10. Фоменко В.С. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов (справочник) / Фоменко В.С., Подчерняева И.А. / Изд-во Наукова думка. Киев. – 1985. с. 620.
11. Оптические свойства полупроводников (Полупроводниковые соединения A^3B^5) / Под ред. У. Виллардсона. – Изд-во Мир. М.: – 1970. с. 560.
12. Векслер А.З., Соколов А.В. К многоэлектронной теории фотоэффекта в кристаллах. / Векслер А.З., Соколов А.В./ ФММ, 1959. № 7 – с. 11–20.

References

1. Tamm I.E. Sobstvennyie (t.e. ne svyazannyie defektami) poverhnostnyie sostoyaniya, lokalizovannyie u poverhnosti kristalla i svobodno rasprostranyayuschiesya vdol nee. / Tamm I. E. ZhETF, 1933. #3, s.34

2. W. Shockly. On the Surface States Associated with Periodic Potentia. //William Shockley/ G. Q. Gobely, F. G. Allen, 56 , p. 317 – 342.
3. J. Bardeen. Surface and Rectification at a Metal Semiconductor Contact. //John Bardeen/ Phys. Rev. 1947, 71 p. 717 – 725.
4. J. Scheer, J van Laar The influence of cesium adsorption on surface fermi level position in gallium arsenide // J. Scheer, J van Laar / Surf. Sci., 1969, 18 p. 130–139.
5. G.Q. Gobely, F.G. Allen Photoelektric Properties of Cleaved GaAs, GaSb, InAs and InSb Surfaces; Comparison with Si and Ge. // G.Q. Gobely, F.G. Allen / Phys. Rev. 1965, 137. – A245–A249.
6. T.E Fischer. Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelekctric emission//Fischer T. E.//North-Holland Publishing Co., Fmgsterdam, Surface Science, 1969, 13 – p. 30 – 51.
7. D. Redfield. Theory for the Photoemission from a Spec-Charge region of a Semiconductor.// D. Redfield / Surf. Sci., 1969. 124 p. 1809 – 1820.
8. Voloshin M.A., Udovichenko S.O., Chernikova I.D. i dr. Sverhvyisokovakuumnyiy fotoelektronnyiy spektrometr dlya issledovaniya poverhnostnyih svoystv tverdyih tel // M. A. Voloshin, S. O. Udovichenko, I. D. Chernikova, N. G. Chernikov / Pratsi Luganskogo viddlennya Mizhnarodnoyi AkademiYi InformatizatsiYi, 2011
9. Bova A.R., Voloshin M.A., Latish O.B. i dr. Vliyanie strukturnyih izmeneniy na poverhnosti na energeticheskiy spektr elektronov v arsenide galliya // A.R. Bova, M.A. Voloshin, O.B. Latish, I.D. Chernikova, N.G. Chernikov / VIsnik SNU Im. V. Dalya, 2010.
10. Fomenko V.S. Jemissionnye i adsorbcionnye svojstva veshhestv i materialov (spravochnik) / Fomenko V.S., Podchernjaeva I.A. / Izd-vo Naukova dumka. Kiev. – 1985. s. 620.
11. Opticheskie svojstva poluprovodnikov (Poluprovodnikovye soedineniya A^3B^5) / Pod red. U. Villardsona. – Izd-vo Mir. M.: – 1970. s. 560.
12. Veksler A.Z., Sokolov A.V. K mnogojelektronnoj teorii fotojefekta v kristallah. / Veksler A.Z., Sokolov A.V. / FMM, 1959. № 7 – с. 11–20.

Черников М.Г., Черникова И.Д., Алиев В.Е. Исследование адсорбции бария на поверхность арсенида галлия фотоэмиссионным методом

Известно, что время от времени установившиеся разделы науки переживают периоды скачкообразного развития, обусловленные появлением качественно новых идей, приборов и методов измерений. Наглядный пример тому – оптическая спектроскопия, которая с появлением лазерных источников света значительно преобразилась. Наряду с интенсивным развитием классических направлений возникли принципиально новые методы и приложения. Среди новых направлений особое место занимает статистический и спектральный анализ световых полей с помощью фотодетекторов – спектроскопия оптического смешения. Экспериментальные методы спектроскопии оптического смешения, в частности исследования по статистике фотоотсчетов, вызвали перед экспериментаторами определенные требования к эффективности фотодетекторов. В данной работе рассматриваются методы и способы получения эффективных фотодетекторов с помощью фотоэмиссии.

Ключевые слова: фотоэмиссия, квантовый выход, распределение электронов по энергиям, спектральный

анализ, работа выхода, электронное сродство, загиб зон, полупроводники, полупроводниковый прибор.

Chernikov N., Chernikova I., Alieff V. Nhe study of the adsorption of barium on the surface of gallium arsenide photoemission method

We know that from time to time established branches of science are experiencing periods of abrupt, caused the emergence of a qualitatively new ideas, devices and measurement methods. An illustrative example of this - optical spectroscopy, which with the advent of the world changed dramatically laser sources. Along with the intensive development of the classic areas of any fundamentally new methods and applications. Among the new areas occupies a special place statistical and spectral analysis of the light fields with the help of photodetectors - optical mixing spectroscopy. Experimental methods of optical mixing spectroscopy, in particular studies on photo- statistics, experimenters have caused to specific requirements for the efficiency of photodetectors. This paper discusses the methods and processes for the preparation of efficient photodetectors.

Keywords: *photoemission quantum yield, the electron energy distribution, spectral analysis, the work function,*

distribution, spectral analysis, the work function, electron affinity, bend zones, semiconductors, semiconductor device.

Черніков Микола Григорійович – к.фіз-мат.н., доцент, кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
chernikov_n_g@ukr.net

Чернікова Ірина Дем'янівна – ст. викл. кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
chernikova_i_d@ukr.net

Алієв Валерій Едуардович – студент групи ГМ-16 Да факультет інженерії, кафедра машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєверодонецьк)
alieff.valery2013@gmail.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Харламов Ю.О.**

Стаття подана 18.02.2019.

УДК 620.318

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ДИСКОВОГО МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Шведчикова І.О., Мелконова І.В.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF OPERABILITY OF NEW CONSTRUCTION DISC MAGNETIC SEPARATOR

Shvedchykova I., Melkonova I.

У статті експериментально підтверджені умови працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції у відповідності до розробленої програми експерименту. Розроблено фізичну модель магнітного сепаратора, проведений порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових сепараторів з магнітними системами різних конфігурацій. Запропоновані напрямки подальших конструктивних удосконалень пристрою.

Ключеві слова: магнітна сепарація, феромагнітні включення, дисковий сепаратор, фізична модель.

Вступ. Для розділення сумішей, що складаються з феромагнітних і немагнітних дрібнодисперсних матеріалів, знайшли застосування дискові сепаратори на постійних магнітах з торцевою активною поверхнею, які утворюють підклас функціонального класу магнітних сепараторів.

Основним недоліком пристроїв для магнітної сепарації на постійних магнітах є складність розвантаження вилучених феромагнітних включень. Розвантаження здійснюється переважно ручним способом при повній зупинці робочого процесу сепарації. Тому проблема розвантаження вилучених феромагнітних включень є однією з актуальних експлуатаційних проблем сепараторів на постійних магнітах. Її вирішення пов'язане з розробкою нових конструктивних варіантів пристроїв з таким розподілом магнітного поля в робочій зоні, при якому забезпечується саморозвантаження або самоочищення робочої поверхні сепаратора без застосування додаткових пристроїв.

Постановка проблеми. При дослідженні магнітних та електромагнітних сепараторів широко застосування отримали експериментальні методи, які засновані на використанні спрощених та зменшених фізичних моделей, явища в яких мають однакову фізичну природу з оригіналом. Практичне застосування методу експериментальних досліджень стало можливим в результаті розвитку теорії подібності та

фізичного моделювання стосовно магнітних сепараторів різних типів [1, 2]. Найчастіше експеримент застосовують на стадії уточнюючих досліджень з метою перевірки адекватності отриманих при теоретичних розрахунках математичних моделей та для обґрунтування вибору раціональної конструкції сепаратора, здатної забезпечити необхідні робочі характеристики.

При системному (попередньому) проектуванні нових пристроїв для магнітної сепарації, як правило, відсутні дані, що підтверджують працездатність пристроїв, тобто їх здатність виконувати усі потрібні функції [3]. Відсутність таких даних обумовлює необхідність застосування модельного експерименту та розроблення відповідної програми та методики його проведення вже на початкових етапах проектування нових магнітних сепараторів. Експериментальні дослідження на ранніх стадіях проектування дозволяють підвищити рівень розуміння задуму проектувальника та відсікти потенційно невдалі варіанти.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Магнітні сепаратори відрізняються складністю та різноманітністю конструкціям, тому для вирішення задач розрахунку магнітних сепараторів знайшли застосування різні методи. Для розрахунків параметрів робочого процесу (транспортування та вилучення феромагнітних включень, розвантаження та очищення полюсів тощо) широко використовують аналітичні методи. Так, в роботі [4] проведено моделювання основних робочих характеристик сепаратора та отримано аналітичне рішення нелінійної системи динамічних і кінематичних рівнянь для визначення траєкторії руху магнітних частинок. В роботі [5] розроблено математичну модель робочого процесу, яка дозволяє визначити здатність магнітосепаруючих пристроїв до вилучення феромагнітних предметів на стадії проектування.

Під час розрахунків магнітних систем сепараторів широко використовують сучасні програмні продукти чисельного моделювання. В роботі [6] за допомогою чисельного моделювання отримані результати розрахунку барабанного сепаратора на постійних магнітах. У роботах [7, 8] обґрунтування нових конструкцій магнітних пристроїв здійснено в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. В роботі [7] вдосконалена конструкція сепаративного каналу для підвищення ефективності та збільшення продуктивності процесу сепарації, в роботі [8] запропонована нова конструкція матриці зі складовими стрижнями для сепарації наночастиць в ліпідних оболонках. Автори робіт [7, 8] вказують на те, що результативність запропонованих систем необхідно перевірити дослідним шляхом.

В роботі [9] вирішена задача визначення оптимальної конструкції магнітної системи сепаратора для створення поля з необхідною силовою характеристикою (H_{grad}). Представлена методика комп'ютерного розрахунку магнітних систем дозволяє створювати таку топологію магнітного поля, яка дає можливість оптимально використовувати масу магнітів і максимально концентрувати магнітну енергію в робочій зоні сепаратора. Використовуючи метод скінченних елементів, можна розрахувати необхідні параметри магнітного поля і конфігурацію сепаратора для конкретного випадку. У роботі [10] з метою оптимізації конструкції магнітного фільтра та його намагнічувальної системи було здійснено імітаційне моделювання на основі методу скінченних елементів.

В роботі [11] описана методика моделювання тривимірного розподілу магнітного поля різних конструкцій постійних магнітів. З метою перевірки моделі проведені експериментальні вимірювання на реальних об'єктах з використанням прецизійного гаусметра. Розроблена методика дозволяє виконувати моделювання розподілу магнітного поля для складних конструкцій постійних магнітів з можливістю перевірки відповідності результатів моделювання і вимірювань.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що більшість авторів для розрахунків характеристик магнітних сепараторів використовують комп'ютерне моделювання на основі методу скінченних елементів. У той самий час експериментальний метод дослідження з застосуванням фізичних моделей, не зважаючи на великі витрати, залишається важливим інструментом дослідників, особливо на початкових етапах проектування нових пристроїв для магнітної сепарації.

Мета статті. Метою роботи є експериментальне підтвердження умов працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції у відповідності до розробленої програми експерименту.

Результати дослідження. В попередніх роботах [12-15] авторами із застосуванням структурно-системного підходу запропоновано нову конструкцію дискового магнітного сепаратора із самоочисною робочою поверхнею (рис.1). Магнітний сепаратор містить феромагнітний диск 1, установлені на

диску магніти 2, розташовані по спіралі на однаковій відстані одна від одної з чергуванням полярності полюсів, як в напрямку розгортання спіралі, так і в радіальному напрямку; обертовий диск 3, виконаний з немагнітного матеріалу і розташований під магнітами 2 в площині, паралельній площині диска 1; фіксований скребок 4, розташований під обертовим диском збоку від конвеєра.

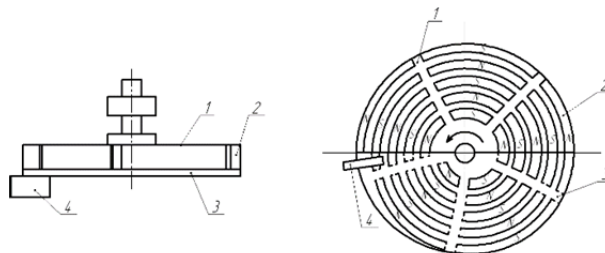


Рис.1. Дисковий магнітний сепаратор:
а – загальний вигляд сепаратора; б – вид знизу
(1 – феромагнітний диск; 2 – магніти;
3 – немагнітний диск; 4 – скребок)

У робочому режимі сепаратор встановлюється над поверхнею сипучого матеріалу з феромагнітними включеннями, які транспортуються стрічковим конвеєром. Немагнітний обертовий диск 3 починає обертатися навколо своєї осі. При цьому в зоні знаходження сипучого матеріалу з феромагнітними металевими включеннями створюється пульсуюче двокомпонентне магнітне поле: біжуче – в радіальному напрямку і обертове – в напрямку обертання немагнітного диска 3. Феромагнітні частки під дією магнітних сил притягуються до поверхні немагнітного диска 3 і починають обертатися разом з ним, одночасно рухаючись в напрямку розгортання спіралі і поступово переходячи по поверхні немагнітного диска 3 в радіальному напрямку, затримуючись біля нерухомого скребка 4.

Розташування магнітів 2 на нерухомому феромагнітному диску 1 по спіралі забезпечує можливість самоочищення поверхні немагнітного обертового диска 3 від феромагнітних включень завдяки створенню умов для їх переміщення в радіальному напрямку без будь-яких додаткових пристроїв. Це значно спрощує процес розвантаження вилучених феромагнітних включень без припинення робочого процесу сепарації.

Поточний робочий стан магнітного сепаратора довільної конструкції може бути описаний певним набором (вектором) \mathbf{u} параметрів (показників якості) u_i

$$\mathbf{u}=(u_1, u_2, \dots, u_i), \quad (1)$$

де $i=1, 2, \dots, k$, k – кількість параметрів.

Ці параметри, як правило, є параметрами-функціоналами, тобто функціональними залежностями. Основними показниками якості магнітного

сепаратора, що відображають правильність його функціонування, є:

- параметри, що характеризують здатність сепаратора до вилучення магнітних (феро- або парамагнітних) включень із немагнітних середовищ;
- параметри, що відображають розвантажувальну здатність пристрою.

Оцінювання цих показників зазвичай проводять з використанням уточнюючих багатоваріантних розрахунків із застосуванням чисельних методів математичного моделювання.

Для магнітного сепаратора згідно технічного рішення важливим показником якості функціонування є його специфічна розвантажувальна здатність, яка проявляється у самоочищенні поверхні немагнітного розвантажувального диску під час робочого режиму сепаратора. Тому для підтвердження цього задуму проектувальників на початкових етапах проектування був проведений експеримент із застосуванням фізичної моделі (експериментального зразку) сепаратора.

Для перевірки працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції була розроблена програма експериментальних досліджень, згідно якої передбачалось

- спроектувати та виготовити експериментальний зразок (фізичну модель) нової конструкції дискового магнітного сепаратора і стенд для дослідження умов працездатності пристрою;
- провести порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових сепараторів з магнітними системами різних конфігурацій;
- визначити частоту обертання немагнітного розвантажувального диску сепаратора та дальність вильоту вилучених феромагнітних предметів з його поверхні;
- розробити практичні рекомендації щодо подальшого конструктивного удосконалення сепаратора.

Нижче наведені результати практичної реалізації програми експериментальних досліджень.

Експериментальна установка. Для оцінювання працездатності магнітного сепаратора була виготовлена експериментальна установка (рис. 2), яка містить у своєму складі фізичну модель сепаратора (феромагнітний диск з магнітами та немагнітний диск), корпус та приводний двигун з регулятором частоти обертання немагнітного розвантажувального диску. Діаметр феромагнітного диску склав 140 мм, немагнітного розвантажувального – 160 мм, відповідно. Основні габаритні розміри установки наведені на рис. 3.

Феромагнітний диск виготовлений зі сталі марки Ст.3. На поверхні феромагнітного нерухомого диску (рис. 2) встановлені призматичні неодимові постійні магніти з геометричними розмірами 25x10x2 мм. Слід зазначити, що виготовлення магнітів секторної форми згідно заявленого технічного рішення мало відбуватися за спеціальним заказом, що призвело б до значного подорожчання фізичної моделі.

Корпус установки та розвантажувальний немагнітний диск виготовлені з нержавіючої сталі. На фізичній моделі передбачена можливість нерухомої фіксації в робочому режимі кожного з дисків, а також можливість регулювання відстані між ними.

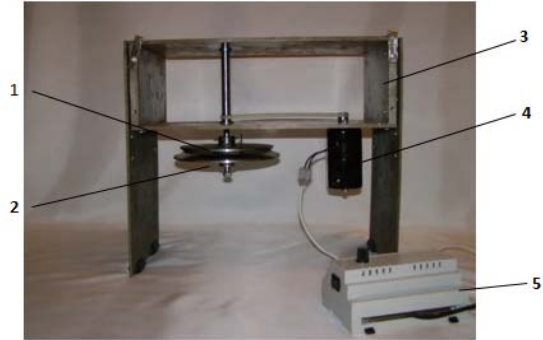


Рис. 2. Експериментальна установка:
1 – феромагнітний диск з магнітами;
2 – немагнітний диск; 3 – корпус;
4 – двигун; 5 – регулятор частоти обертання двигуна

Немагнітний диск приводиться в обертання через клиноремінну передачу двигуном постійного струму, для якого передбачена можливість регулювання його частоти обертання в діапазоні 0...7000 об/хв. Принципова електрична схема регулятора швидкості обертання двигуна показана на рис.4. В основі її роботи лежить фазовий спосіб регулювання частоти.

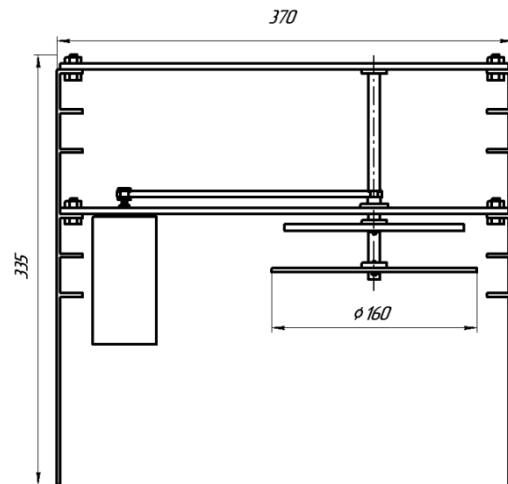


Рис. 3. Загальний вигляд експериментальної установки із зазначенням її геометричних розмірів

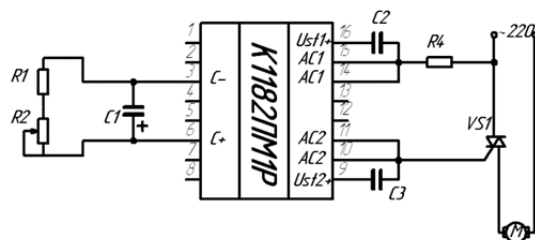


Рис. 4. Схема регулятора частоти обертання двигуна

2. *Порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових сепараторів з різними магнітними системами.* Для проведення порівняльного аналізу було обрано п'ять варіантів магнітних систем з розташуванням магнітів, як показано на рис. 5.

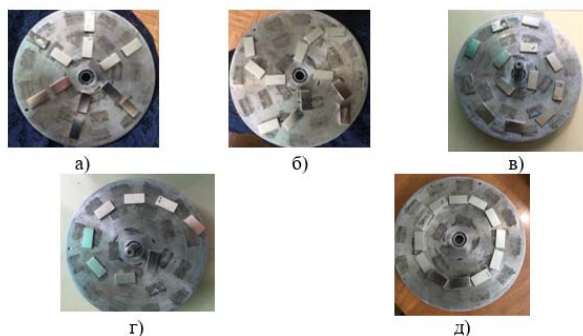


Рис. 5. Варіанти досліджуваних магнітних систем з розташуванням магнітів:

- а – зіркою з прямолінійними променями;
- б – зіркою з криволінійними променями;
- в – вздовж двохвиткової спіралі Архімеда;
- г – вздовж одновиткової спіралі Архімеда;
- д – по окружності

В якості робочих феромагнітних тіл були використані звичайні канцелярська скріпка та сталевий стружка. Відбувався запис на відео траєкторії переміщення феромагнітних об'єктів вздовж розвантажувального диску. Частота обертання немагнітного розвантажувального диску змінювалася у межах 40-70 об/хв. Частота обертання валу двигуна вимірювалась за допомогою тахометра ТКМ-6000 з діапазоном вимірювань (0...6000) об/хв.

Експериментальні випробування показали, що варіант магнітної системи з розташуванням магнітів вздовж двохвиткової спіралі Архімеда (рис. 5, в) був єдиним, де при прийнятих частотах обертання валу немагнітного розвантажувального диску відбувалося самоочищення його поверхні шляхом переміщення досліджуваних феромагнітних включень вздовж спіралі до їх повного відпадання в приймач для феромагнітних включень [16]. Таким чином, можна вважати, що найкращі результати з розвантаження феромагнітних включень забезпечує магнітна система з розташуванням магнітів вздовж багатовиткової спіралі, для якої кількість витків N задовольняє умові $N \geq 2$.

3. *Визначення частоти обертання немагнітного диску сепаратора.* На даному етапі досліджень авторами оцінювалася припустима дальність скидання вилучених феромагнітних предметів з поверхні обертового немагнітного диску і, відповідно, частота обертання немагнітного диску сепаратора. З урахуванням того, що спеціальні бункери для прийому феромагнітних включень зазвичай встановлюють збоку в безпосередній близькості від конвеєрної стрічки, то припустимою будемо вважати відстань, що не перевищує величини $(1...1,5)D$, де D – діаметр феромагнітного диску сепаратора.

При проведенні експерименту в якості робочих феромагнітних тіл були прийняті феромагнітні кулі з діаметрами 2,4 мм та 4,7 мм, виконані з підшипниковою сталлю марки ШХ4. Куляста форма робочих тіл обрана з наступних причин. Відомо, що феромагнітні включення кулястої форми в більшості випадків мають перевагу в загальній масі феромагнітних включень, що перебувають в досліджуваному сипучому середовищі [17]. Так, наприклад, в відпрацьованій формувальній суміші маса кулястих включень становить близько 40% загальної маси всіх включень у виборці. Крім того, кулясті включення найгірше піддаються вилученню. В ході експерименту також встановлено, що надійне вилучення робочих феромагнітних тіл забезпечується в діапазоні частот обертання немагнітного диску, яке становить 55-70 об/хв. При більш високій частоті дальність вильоту феромагнітних предметів перевищує порогову величину $(1...1,5)D$. Встановлено також, що феромагнітні кульки діаметром 4,7 мм вилучаються краще при низьких частотах обертання диску (близько 30-40 об/хв).

Для порівняння слід відмітити наступне. Припустимо, що розвантаження вилучених феромагнітних включень в дискових магнітних сепараторах традиційної конструкції (з розташуванням магнітів по окружності, рис. 5, д) здійснюється шляхом підвищення частоти обертання диска, а створювані при цьому відцентрові сили є достатніми для автоматичного видалення включень. Тоді, як встановлено в роботі [18], мінімальна частота обертання ω диску, за якої почнеться ковзання об'єкту, розташованого на відстані $R=50$ мм від осі обертання диску, складатиме: для ферит-барієвих магнітних систем – 241 об/хв; для магнітних систем на основі рідкоземельних магнітів – 526 об/хв. Таке суттєве підвищення частоти обертання диску призведе як до ускладнення електроприводу, так й до додаткових складнощів в організації зон розвантаження, тому що траєкторії ковзання вилучених об'єктів вздовж диска неможливо передбачити.

4. *Практичні рекомендації щодо подальшого конструктивного удосконалення сепаратора.* Попередні експериментальні дослідження дискового магнітного сепаратора дозволили визначити два основні напрямки удосконалення його конструкції:

1. Для спрощення та здешевлення нової конструкції сепаратора доцільною є заміна сектороподібних магнітів, які пропонуються в заявленому технічному рішенні [15], на неодимові постійні магніти, що мають форму призми.

2. Для покращення розвантаження вилучених феромагнітних включень за рахунок зменшення дальності їх вильоту з поверхні розвантажувального немагнітного диску необхідно передбачити додаткові умови для ослаблення магнітного поля в зоні розвантаження.

Наведені практичні рекомендації мають бути враховані при проведенні подальших уточнюючих розрахунків показників якості дискового магнітного сепаратора із самоочисною робочою поверхнею.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали:

1. Для підвищення рівня розуміння задуму проектувальника та визначення напрямків подальших конструктивних удосконалень технічних пристроїв важливо використовувати експеримент вже на початкових етапах проектування.

2. Запропоновану конструкцію дискового магнітного сепаратора можна використовувати для сепарації сипких речовин з метою поліпшення умов розвантаження вилучених феромагнітних включень. Для спрощення та здешевлення нової конструкції сепаратора може бути здійснена заміна сектороподібних магнітів згідно технічного рішення на призматичні неодимові постійні магніти.

3. Найкращі результати з розвантаження феромагнітних включень забезпечує магнітна система з розташуванням магнітів вздовж багатовиткової спіралі, для якої кількість витків N задовольняє умові $N \geq 2$, а частота обертання валу розвантажувального диску складає близько 55-70 об/хв.

Література

- Загірняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: [монография] / М.В. Загірняк, Ю.А.Бранспиз, І.А. Шведчикова; под ред. М.В. Загірняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
- Загірняк М.В. Шкивные магнитные сепараторы / М.В. Загірняк, Ю.А. Бранспиз. – К.: Техніка, 2000. – 304с.
- ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
- Бульжев Е.М. Расчет характеристик качества очистки сож при проектировании патронного магнитного сепаратора / Е.М. Бульжев, Е.Н. Меньшов, Г.А. Орлов // Справочник. Инженерный журнал. – 2014. – № 2 (203). – С. 35-45.
- Сайко О.П. Шкивные железоотделители на постоянных магнитах / О.П. Сайко, В.И. Дробченко, А.С. Кофанов, С.М. Подолох // Уголь Украины. – 2012. – № 7. – С. 43-45. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2012_7_9
- Лозин А.А. Использование информационно-аналитических технологий при расчете и моделировании стационарных магнитных систем в конструировании сепараторов на постоянных магнитах / А.А. Лозин, В.М. Арсенюк, Я.Б. Петровский // Горный журнал. – 2004. – №5. – Режим доступа: <http://www.prodecolog.com.ua/pdf/gorec.pdf>.
- Кондратенко И.П. Исследование магнитогидродинамического сепаратора / И.П. Кондратенко, А.В. Некрасов, Е.Е. Волканин // Электромеханика и энергосберегающие системы. – 2011. – № 3/2011 (15). – С.107-109.
- Кондратенко И.П. Электротехническая система с составными стержнями для высокоградиентной магнитной сепарации / И.П. Кондратенко, А.В. Некрасов, Е.Е. Волканин // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 38–41.
- Кондратенко И.П. Использование метода конечных элементов при проектировании магнитного сепаратора наночастиц. / И.П. Кондратенко, А.В. Некрасов, Е.Е. Волканин // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2010. – № 28. – С. 491-493.
- Третьяк А.Я. Выбор оптимального магнитного поля с целью регенерации фильтров гидрогеологических скважин / А.Я. Третьяк, М.Л. Бурда, Д.В. Шайхутдинов, С.А. Онофриенко // Известия вузов. Северо – Кавказский регион. – 2011. – № 4. – С.121-124.
- Прачуковська А.П. Моделирование и верификация распределения магнитного поля постоянных магнитов / А.П. Прачуковська, М.С. Новицки, І.В. Коробийчук, Р.Ю. Шевчик, Я.Л. Салах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6(5). – С. 4-11. – Режим доступа: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte20156%285%292>
- Шведчикова І.А. Структурно-системний аналіз магнітних сепараторів с торцевої активної поверхню / І.А. Шведчикова, І.В. Никитченко // Електромеханічні і енергозберегаючі системи. – 2016. – № 3(35). – С. 57-63.
- Никитченко І.В. Построение генетической модели структурообразования магнитных сепараторов с торцевой активной поверхностью / И.В. Никитченко, І.А. Шведчикова // II Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Технічні науки в Україні: погляд у майбутнє», м. Сєверодонецьк – Сєверодонецьк 27-28 квітня 2017 р. – С. 119-123.
- Шинкаренко В.Ф. Решение задач поискового проектирования магнитных сепараторов с использованием структурно-системного подхода / В.Ф. Шинкаренко, М.В. Загірняк І.А. Шведчикова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 1. – С.69-76.
- Патент на корисну модель № 116288, Україна, В03С 1/24. Пристрій для вилучення феромагнітних включень / Шведчикова І.О., Нікітченко І.В., Морнева М.О.; патентовласник: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля; заявл. 16.12.16; опубл. 10.05.17, Бюл. № 09. – 4 с.
- Нікітченко І.В. Порівняльний аналіз розвантажувальної здатності дискових магнітних сепараторів з магнітними системами різних конфігурацій / І.В. Нікітченко, І.О. Шведчикова // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 15 червня 2018 р.). Київ: КНУТД, 2018. – С. 72-73.
- Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители / В.Ф. Сумцов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 174 с.
- Шведчикова І.О. Дослідження розвантажувальної здатності дискових магнітних сепараторів / І.О. Шведчикова, І.В. Нікітченко, І.В. Масляник // Майбутній науковець: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (Сєверодонецьк, 1 грудня 2017 р.). Сєверодонецьк: СХУ ім. В. Даля, 2017. – С. 425-426.

References

- Zagirnyak M.V. Magnitnyye separatory. Problemy proyektirovaniya: [monografiya] / M.V. Zagirnyak, YU.A. Brans-piz, I.A. Shvedchikova; pod red. M.V. Zagirnyaka. – K.: Tekhnika, 2011. – 224 s.
- Zagirnyak M.V. Shkivnyye magnitnyye separatory / M.V. Zagirnyak, YU.A. Branspiz. K: Tekhnika, 2000. – 304 s.
- DSTU 2860-94 Nadiynist tekhniki. Termini ta viznachenya. — K.: Derzhstandart Ukrain, 1994. — 36 s.
- Bulyzhev Ye.M. Raschet kharakteristik kachestva oshistki sozh pri proyektirovanii patronnogo magnitnogo

- separatora / Ye.M. Bulyzhev, Ye.N. Men'shov, G.A. Orlov // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. – 2014. – № 2 (203). – S. 35–45.
5. Sayko O.P. Shkivnyye zhelezootdeliteli na postoyannykh magnitakh / O.P. Sayko, V.I. Drobchenko, A.S. Kofanov, S.M. Podolyukh // Ugol' Ukrainy. – 2012. – № 7. – S. 43–45. – Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ugukr_2012_7_9
 6. Lozin A.A. Ispol'zovaniye informatsionno-analiticheskikh tekhnologiy pri raschete i modelirovani statsionarnykh magnitnykh sistem v konstruirovani separatorov na postoyannykh magnitakh / A.A. Lozin, V.M. Arsenyuk, YA.B. Petrivskiy // Gornyy zhurnal. – 2004. – №5. – Rezhim dostupa: <http://www.prodecolog.com.ua/pdf/gorec.pdf>.
 7. Kondratenko I.P. Issledovaniye magnitogidrodinamicheskogo separatora / I.P. Kondratenko, A.V. Nekrasov, Ye.Ye. Volkanin // Yelektromekhanichni i yenergosberegayuchi sistemi. – 2011. – № 3/2011 (15). – S.107-109.
 8. Kondratenko I.P. Elektrotekhnicheskaya sistema s sostavnymi sterzhnyami dlya vysokoradiyentnoy magnitnoy separatsii / I.P. Kondratenko, A.V. Nekrasov, Ye.Ye. Volkanin // Yelektrotekhnika i yelektromekhanika. – 2012. – № 2. – S. 38–41.
 9. Kondratenko I.P. The use of the finite element method in the design of a magnetic separator nanoparticles. / I.P. Kondratenko, A.V. Nekrasov, E.E. Volkanin // Problems of an automated electric drive. Theory and practice. Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – 2010. – № 28. – P. 491–493.
 10. Tret'yak A.YA. Vybora optimal'nogo magnitnogo polya s tsel'yu regeneratsii fil'trov gidrogeologicheskikh skvazhin / A.YA. Tret'yak, M.L. Burda, D.V. Shaykhutdinov, S.A. Onofriyenko // Izvestiya vuzov. Severo – Kavkazskiy region. – 2011. – № 4. – S.121-124
 11. Prachukovs'ka A. P. Modelirovaniye i verifikatsiya raspredeleniya magnitnogo polya postoyannykh magnetov / A.P. Prachukovs'ka, M.S. Novitski, I.V. Korobiychuk, R.YU. Shevchik, YA.L. Salakh // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal pere-dovykh tekhnologiy. – 2015. – № 6(5). – S. 4–11. – Rezhim dostupu: <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte20156%285%292>.
 12. Shvedchikova I.A. Strukturno-sistemnyy analiz magnitnykh separatorov s tortsevoy aktivnoy poverkhnost'yu / I.A. Shvedchikova, I.V. Nikitchenko // Yelektromekhanichni i yenergosberegayuchi sistemi. – 2016. – № 3(35). – S. 57-63.
 13. Nykytchenko Y.V. Postroyeniye henetycheskoy modeli strukturoobrazovaniya mahnytnykh separatorov s tortsevoy aktivnoy poverkhnost'yu / Y.V. Nykytchenko, Y.A. Shvedchikova // II Vseukrayins'ka internet-konferentsiya studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh «Tekhnichni nauky v Ukraini: pohlyad u maybutnye», m. Syevyerodonets'k – Syevyerodonets'k 27-28 kvitnya 2017 r. – S. 119-123.
 14. Shinkarenko V.F. Resheniye zadach poiskovogo proyektirovaniya magnitnykh separatorov s ispol'zovaniyem strukturo-sistemnogo podkhoda / V.F. Shinkarenko, M.V. Zagirnyak I.A. Shvedchikova // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. – 2010. – № 1. – S.69-76.
 15. Patent na korisnu model' № 116288, Ukraïna, V03S 1/24. Pristriy dlya viluchenniya ferromagnitnikh vkluchen' / Shvedchikova I. O., Nikitchenko I. V., Momeva M.O.; paten-tovlasnik: Skhidnoukrainskiy natsionalniy universitet imeni Volodimira Dallya; zayavl. 16.12.16; opubl. 10.05.17, Byul. № 09. – 4 s.
 16. Nikitchenko I.V. Porivnyal'nyy analiz rozvantazhuval'noyi zdatnosti diskovykh mahnitnykh separatoriv z mahnitnyu systemamy riznykh konfihuratsiy / I.V. Nikitchenko, I.O. Shvedchikova // Mekhatronni systemy: innovatsiyi ta inzhynirnyh: zbirnyk tez dopovidey II mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi (Kyiv, 15 chervnya 2018 r.). Kyiv: KNUTD, 2018. S. 72–73.
 17. Sumtsov V. F. Elektromagnitnyye zhelezootdeliteli / V. F. Sumtsov. – Moskva: Mashinostroyeniye, 1978. – 174 s.
 18. Shvedchikova I.O. Doslidzhennya rozvantazhuval'noyi zdatnosti diskovykh mahnitnykh separatoriv / I.O. Shvedchikova, I.V. Nikitchenko, I.V. Maslyanyk // Maybutniy naukovets': materialy Vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi (Syevyerodonets'k, 1 hrudnya 2017 r.). Syevyerodonets'k: SNU im. V. Dallya, 2017. S. 425 – 426.
- Шведчикова И.А., Мелконова И.В.**
Экспериментальная проверка работоспособности дискового магнитного сепаратора новой конструкции
В статье экспериментально подтверждены условия работоспособности дискового магнитного сепаратора новой конструкции в соответствии с разработанной программой эксперимента. Разработана физическая модель магнитного сепаратора, проведен сравнительный анализ разгрузочной способности дисковых сепараторов с магнитными системами различных конфигураций. Предложенные направления дальнейших конструктивных усовершенствований устройства.
- Ключевые слова:** магнитная сепарация, ферромагнитные включения, дисковый сепаратор, физическая модель.
- Shvedchikova I., Melkonova I. Experimental verification of operability of new construction disc magnetic separator**
Design of disk magnetic separator, which can be used for separation of bulk materials, is proposed in the paper. The operating conditions of disk magnetic separator of new design in accordance with the developed program of the experiment are experimentally confirmed in the paper. A physical model of a magnetic separator has been developed, and a comparative analysis of the discharge capacity of disk separators with magnetic systems of various configurations has been carried out. Directions for further design improvements of the device are suggested.
- Keywords:** magnetic separation, ferromagnetic inclusions, disk separator, physical model.
- Шведчикова Ірина Олексіївна** – д.т.н., проф., професор кафедри енергоменеджменту та прикладної електроніки Київського національного університету технологій та дизайну (м. Київ) ishved89@gmail.com
Мелконова Інна Вікторівна – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), inna.mia.lg@gmail.com
- Рецензент:* д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**
- Стаття подана 23.01.2019.

УДК 621.9.048

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВНИХ ГРАНУЛ НА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВІБРАЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ**Шумакова Т.О., Ніколаєнко А.П., Романченко О.В., Таванюк Т.Я., Логунов О.М.****RESEARCH OF THE EFFECT OF ABRASIVE GRANULES GEOMETRICAL PARAMETERS ON ROUGHNESS OF PARTS SURFACE WITH VIBRATION TREATMENT****Shumakova T., Nikolaenko A., Romanchenko A., Tavanyuk T., Logunov O.M.**

У статті проведено аналіз існуючих математичних залежностей, які використовуються для визначення шорсткості поверхні деталей, що оброблюються в середовищі вільних абразивів. Експериментально, на прикладі обробки зразків зі сталі Ст3, дюралюмінієвого сплаву Д16 і латуні ЛС59-1, встановлено вплив на шорсткість оброблених поверхонь форми абразивних гранул. Встановлено, що найбільш ефективними для підвищення якості поверхонь деталей є гранули у формі П12.

Ключові слова: вібраційна обробка, абразивна гранула, шорсткість поверхні, вібраційне шліфування, підвищення ефективності, операційний час.

Вступ. Вібраційна обробка деталей у середовищі вільних абразивів відноситься до динамічних методів безрозмірної механічної обробки. Обладнанням для її здійснення є вібраційні верстати різних типів [1, 2, 3]. В якості інструменту (робочого середовища) використовуються абразивні гранули. Тип, характеристики і розміри абразивних гранул вибираються в залежності від призначення технологічної операції [4, 5, 6].

Процес вібраційної обробки деталей відбувається шляхом нанесення безлічі мікроударів по оброблюваній поверхні частинками робочого середовища (абразивними гранулами), що коливаються під дією вібраційного впливу. Оброблювані деталі завантажуються в контейнер верстата, заповнений робочим середовищем. Контейнер, змонтовано на пружинах і має можливість коливатися в різних напрямках. Вібрація контейнеру передається від обертового валу з незбалансованими вантажами з частотою 15-50 Гц та амплітудою 0,5-9 мм [7, 8]. Робоче середовище та оброблювані деталі приходять в інтенсивне відносне обертання всієї маси (циркуляційний рух). Від стінок контейнера вібрація передається прилеглим шарам робочого середовища, які передають її наступним шарам і т.д. Оброблювані деталі

займають різне положення в робочому середовищі, що забезпечує досить рівномірний знімання матеріалу з усіх поверхонь, що контактують з абразивними гранулами.

Під дією вібрацій обробка відбувається в усіх зонах контейнера верстату, ефективніше вона ближче до донної частини, де тиск робочого середовища вищий. По мірі віддалення від стінок робочого контейнера амплітуда коливань частинок робочого середовища і інтенсивність обробки зменшується [7, 8].

Більшість операцій вібраційної обробки проводиться з безперервною або періодичною подачею рідкого розчину необхідного складу в контейнер [9, 10]. Рідкий розчин забезпечує видалення продуктів зносу (часток металу і абразиву) з поверхні деталей і часток робочого середовища, змочує деталь і робоче середовище, допомагає їх поділу та рівномірному розподілу деталей в робочому середовищі. Шляхом зміни рівня рідини в камері регулюється інтенсивність обробки. Інтенсивність вібраційної обробки залежить також від режимів та тривалості обробки, характеристики і розмірів абразивних гранул, обсягу камери і ступеня її заповнення, механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей і ін.

Завдяки високій ефективності та універсальності віброабразивна обробка застосовується в різних сферах виробництва [11, 12, 13, 14, 15]. Вібраційна обробка має широкі технологічні можливості. Вона застосовується: на очисних операціях (очищення від слідів нагару, окалини, іржі, накипу, формувальної суміші і ін.); на оздоблювальних операціях (видалення задирок, облою, округлення гострих кромки і ін.); на операціях підготовки поверхонь під покриття, надання товарного вигляду; на операціях шліфування (з метою здобуття шорсткості поверхні $Ra = 0,63-1,25$ мкм) та полірування (для отримання шорсткості $Ra = 0,08-0,32$ мкм), деяких інших опе-

раціях. Обробці можуть піддаватися будь-які деталі, незалежно від їх форми, отримані штампуванням або литтям, до або після механічної обробки, виготовлені з різних металів і сплавів [16].

Шорсткість поверхні деталі при вібраційній обробці змінюється з часом за експоненціальною залежністю до певних меж, а при продовженні процесу обробки залишається без змін (така шорсткість поверхні отримала назву сталої) [17]. Параметри сталої шорсткості залежать від конкретних умов вібраційної обробки деталі. При дослідженні процесу віброобробки одним з головних питань є визначення параметрів сталої шорсткості, що отримується в даному робочому середовищі при певних режимах обробки [18]. Наразі немає чіткої залежності для визначення шорсткості поверхні при вібраційній обробці.

Аналіз досліджень і публікацій. Теоретичне визначення параметрів шорсткості обробленої поверхні при вібраційній обробці є ще складною задачею через значне число змінних чинників, що впливають на процес формування профілю шорсткості поверхні деталі. Так, в роботах [19] професор Литовка Г.В. наводить залежність, яка, на думку автора, в значній мірі відображає вплив основних чинників процесу вібраційної обробки на шорсткість поверхонь деталей:

$$E(R_a) = \frac{0,1178}{\pi \cdot \sqrt[3]{\mu}} \cdot 4 \sqrt{\frac{c \cdot k^2}{\alpha_\varepsilon^5}} \cdot L, \quad (1)$$

де: $E(R_a)$ – математичне очікування параметру $R(a)$, що характеризує середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості виробу;

μ – коефіцієнт, що залежить від форми гранул;

c, k – параметри, що характеризують процес формування шорсткості поверхні при вібраційній обробці деталей абразивними гранулами;

L – гострота рельєфу гранули, що визначається за формулою:

$$L = 3,385 \cdot K \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \alpha_\varepsilon^{3/2}, \quad (2)$$

де $K = \frac{k_1}{k_2}$, а k_1, k_2 – коефіцієнти пропорційності [19];

$\alpha_\varepsilon, \sigma_\varepsilon$ – статистичні параметри профілю рельєфу абразивної гранули.

Аналізуючи залежність (1) можна зробити висновок, що найбільший вплив на величину $E(R_a)$ має параметр L , а саме гострота рельєфу абразивної гранули, який представляє собою не що інше, як кривизну лінії профілю гранул абразивного наповнювача в певній точці. При цьому в залежності (2) єдиною змінною величиною є σ_ε , яка, як вказано в роботі [19] є середнім квадратичним відхиленням

ординат профілю рельєфу абразивних гранул і визначається експериментальним шляхом.

В роботі [20] Тамаркіним М.А. для визначення шорсткості було запропоновано залежність:

$$R_a = \frac{H_0}{6,32 \sqrt{0,32 h_{\max} z_0}}, \quad (3)$$

де H_0 – визначається експериментально. В результаті обробки експериментальних даних отримано залежність:

$$H_0 = 10^9 C \frac{\sigma_0}{\sigma_s}, \quad (4)$$

де C – коефіцієнт, що залежить від зернистості абразивного середовища ($0,1 \leq C \leq 0,4$); σ_0 – середнє квадратичне відхилення вильоту зерна на Δ ; σ_s – межа текучості оброблюваного матеріалу.

Дана залежність враховує, що контакт абразивних гранул з поверхнею деталі відбувається на рівні вершин окремих зерен. Користуючись цією залежністю, можна розрахувати значення R_a для сталої шорсткості, що досягається при вібраційній обробці деталей з різних матеріалів в різних робочих середовищах, але при цьому не враховані, наприклад, такі параметри процесу, як режими роботи верстата, чи форма інструменту, що використовується при обробці деталей.

Автором роботи [21] також запропоновано залежність зміни шорсткості оброблюваної поверхні від часу обробки, яка виражається ступеневою функцією виду:

$$R_a = AB^t, \quad (5)$$

де A і B – постійні коефіцієнти; t – час.

Ця залежність могла б бути використана при розрахунку часу, необхідного для віброабразивної обробки деталей у технологічному циклі обробки, якби автор надав інформацію про значення величин A і B , а також вказав, в якому об'ємі вони характеризують різні умови обробки.

Бабічевим А.П. [17, 22] в основу теоретичних досліджень, що визначають параметри шорсткості поверхні деталей, які були оброблені вібраційним методом у середовищі вільних абразивів, було покладено взаємодію абразивних гранул з поверхнею деталі та зняттям при цьому припуску, який вимірювався від вершини вихідної мікронерівності, що має вигляд трикутної призми, до її основи. В якості відправного співвідношення для розрахунку автором було прийнято, що:

$$R_{z_{обр}} = R_{z_{исх}} - \delta, \quad (6)$$

де $R_{z_{обр}}$ – шорсткість поверхні деталі після обробки;

$R_{z_{исх}}$ – шорсткість вихідної поверхні;

δ – товщина шару, що знімається при обробці з поверхні деталі, визначається формулою:

$$\delta = \frac{Q}{\gamma \cdot L_g \cdot h_{np}}, \quad (7)$$

де Q – знімання металу; γ – питома вага матеріалу деталей, що оброблюються; L_g – сумарна довжина основ трикутників на розглянутій ділянці; h_{np} – висота трикутної призми.

У роботі Левенгарца В.Л. [23] представлена функціональна залежність, що описує зміну мікрогеометрії оброблюваної поверхні:

$$R_z^r = R_z^{исх} - T_{max} \left(1 - e^{-\alpha(\tau^{\beta+1} / \beta + 1)} \right), \quad (8)$$

де R_z^r – кінцева висота мікронерівностей, мкм;

$R_z^{исх}$ – початкова висота мікронерівностей, мкм;

T_{max} – максимальне зменшення мікронерівностей, мкм; α, β – величини, що характеризують різні умови обробки ($\alpha > 0, -1 < \beta < 0$); τ – час обробки, час.

Якщо порівняти залежність (8), при $\tau = \infty$, з залежністю (6), то можна зробити висновок, що T_{max} по суті тотожна параметру δ . Згідно з (7), величина δ знаходиться в прямій залежності від знімання металу. Отже, аналіз виразів (7) та (8) показує, що шорсткість обробленої поверхні знаходиться в прямій залежності від знімання металу. В такому випадку з результатів проведеного аналізу отримуємо що, за інших рівних умов, шорсткість поверхні деталі, що було оброблено в середовищі вільних абразивів повинна не залежати від форми гранул. За даними ж експериментів, що наведено в [4, 24] форма гранул суттєво впливає на висоту мікронерівностей поверхні деталі. Звідси випливає, що побудова розрахункових формул для визначення шорсткості поверхонь на основі знімання не в повній мірі відображає реальний стан.

В роботі [25] авторами проведено детальний аналіз чинників, що впливають на шорсткість поверхні деталі при її вібраційній обробці. В результаті в [25] було встановлено функціональний взаємозв'язок сукупності факторів, у вигляді залежності:

$$R_a(f) = f(V_0, P, \omega, K_\phi, K_\kappa, N_3(K_3), K_p, \sigma_T, R, B, \rho_{аб}, \rho_d, t), \quad (9)$$

де V_0 – швидкість руху абразивної гранули; P – сила опору; ω – частота коливань; K_ϕ – коефіцієнт, що враховує форму абразивної гранули; K_κ – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації абразивних зерен; N_3 – зернистість абразиву; K_3 – коефіцієнт, що враховує зернистість абразиву; K_p –

коефіцієнт, що враховує кількість ріжучих зерен; σ_T – межа текучості матеріалу деталі; R – характерний розмір гранули; B – характеристика зв'язки; $\rho_{аб}, \rho_d$ – густина матеріалу абразиву, деталі; t – час обробки.

Нажаль автори роботи [25] не наводять чисельних значень параметрів залежності (9), що не дозволяє перейти до її практичного використання в технологічній практиці.

В результаті проведеного аналізу існуючих моделей, які описують вплив параметрів процесу вібраційної обробки на сталу шорсткість поверхонь деталей можна зробити висновок, що запропоновані залежності не дозволяють провести розрахунок параметрів, що характеризують поверхні після вібраційної обробки, вони не відображають повною мірою зв'язок між умовами обробки і якісними параметрами шорсткості поверхні виробів. На жаль, з причина багатofакторності процесу, на теперішній час, уявлення про якість поверхні після вібраційної обробки є результатом експериментальних досліджень.

Мета досліджень. Встановлення впливу на якісні показники процесу вібраційної обробки похідного стану поверхонь зразків і форми інструменту при вібраційній обробці зразків в середовищі вільних абразивів.

Результати досліджень. Для досягнення поставленої цілі був проведений ряд експериментальних досліджень. При проведенні досліджень були прийняті наступні постійні умови:

1. Всі дослідження було виконано на верстаті УВІ-25 з U-подібною формою контейнера (рис. 1). Для скорочення часу обробки зразків на операції шліфування контейнер верстата УВІ-25 було поділено перегородками. Це дозволило одночасно проводити обробку 5 різних груп зразків з використанням різних абразивних гранул різних форм.



Рис. 1. Зовнішній вигляд контейнера вібраційного верстата УВІ-25

2. При вібраційній обробці зразків були використані наступні режими роботи верста:

– частота коливань $f = 50$ Гц;

– амплітуда коливань $A = 3,5$ мм.

3. При виконання операцій вібраційного шліфування використовувалися абразивні гранули з бою шарошліфувальних кругів АН-2, конуси, піраміди, в основі яких лежить квадрат (П4), двосторонні піраміди в поперечному перерізі яких лежить не-

опуклий шестикутник (П12). Зовнішній вигляд гранул наведено на рис. 2.



Рис. 2. Інструмент, що використовувався при обробці зразків

4. При проведенні експериментів досліджувалися зразки виконані з сталі Ст3 (ДСТУ 2651:2005), сплаву латуні ЛС59-1 (ДСТУ ГОСТ 15527-2004) та дюралюмінієвого сплаву Д16 (ГОСТ 4784-97). Кожна з груп зразків мала різний похідний стан поверхонь. Так сталеві зразки були в стані поставки (гарячекатаний прокат), після чорнового точіння та чистового точіння – 1-3 група співвідносно. Латунні та дюралюмінієві зразки також були представлені в 3 групах – до механічної обробки (калібрований прокат), після чорнкової лезової обробки, після чистової обробки. Зовнішній вигляд зразків наведено на рис. 3. Кількість зразків кожної групи становила 40 шт. Більш детальна інформація стосовно стану поверхонь, матеріалу та розмірів зразків, що досліджувалися наведена в таблиці 1.

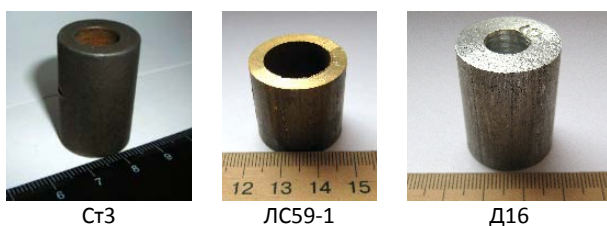


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків, що досліджувалися

5. У кожному з робочих середовищ, що складалися з гранул різних геометричних форм, одночасно оброблялися по 10 зразків певної групи.

6. Обробка всіх досліджуваних зразків на операції шліфування проводилася протягом 4 годин.

Контроль шорсткості поверхні зразків відбувався через кожну годину обробки.

7. За критерій ефективності процесу вібраційної обробки було прийнято час за який було досягнута необхідна шорсткість поверхонь оброблюваних зразків.

Таблиця 1

Характеристики зразків, що досліджувалися

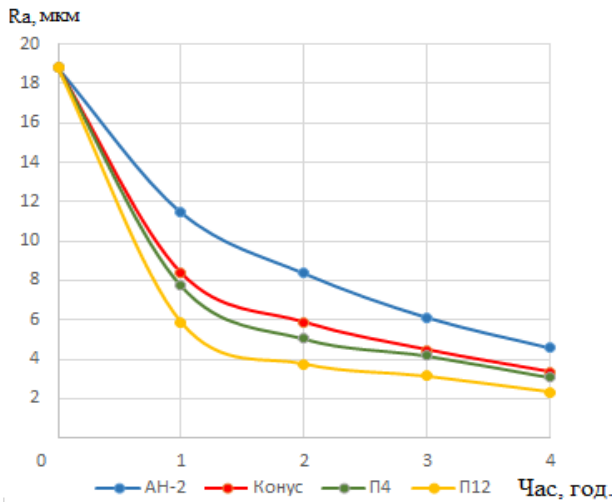
№ групи	Матеріал	Розмір $d \times h \times s$, мм	Стан поверхні	Середня шорсткість поверхні, R_a , мкм
1	Ст3	$\varnothing 17 \times 25 \times 7$	Прокат	18,8
2			Чорнове точіння	9,05
3			Чистове точіння	6,5
4	ЛС59-1	$\varnothing 27 \times 25 \times 5$	Прокат	8,2
5			Чорнове точіння	4,83
6			Чистове точіння	3,44
7	Д16	$\varnothing 25 \times 33 \times 8$	Прокат	19,7
8			Чорнове точіння	9,8
9			Чистове точіння	7,1

Результати експериментальних досліджень якісних показників вібраційної обробки зразків з різним станом похідної поверхні наведено в табл. 2-4 та на рис. 4-6.

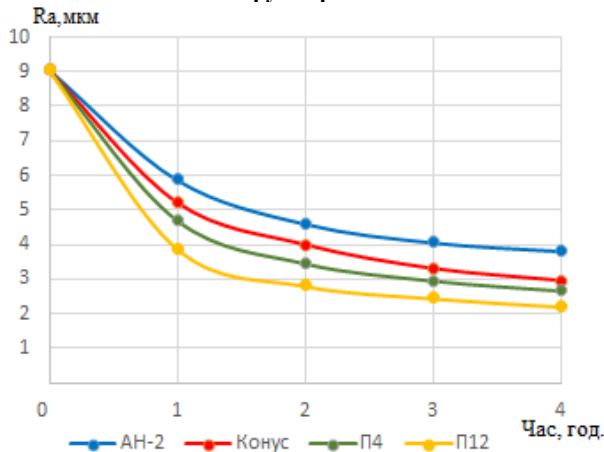
Таблиця 2

Середні значення шорсткості поверхонь R_a (мкм) зразків із сталі Ст3 після їх вібраційного шліфування в різних робочих середовищах

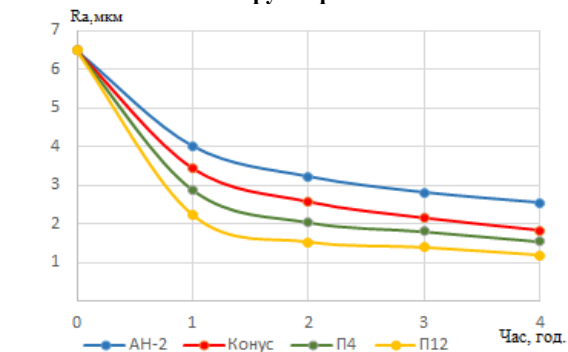
Час обробки, год.	Форма гранул			
	АН-2	Конус	П4	П12
Прокат гарячекатаний (1 група)				
1	11,46	8,36	7,73	5,88
2	8,36	5,86	5,04	3,76
3	6,12	4,46	4,18	3,14
4	4,57	3,33	3,08	2,34
Чорнове точіння (2 група)				
1	5,88	5,22	4,71	3,89
2	4,61	4	3,46	2,81
3	4,07	3,31	2,96	2,45
4	3,82	2,96	2,67	2,21
Чистове точіння (3 група)				
1	4,02	3,45	2,89	2,24
2	3,23	2,68	2,25	1,74
3	2,82	2,16	1,81	1,40
4	2,55	1,84	1,55	1,20



1 група зразків



2 група зразків



3 група зразків

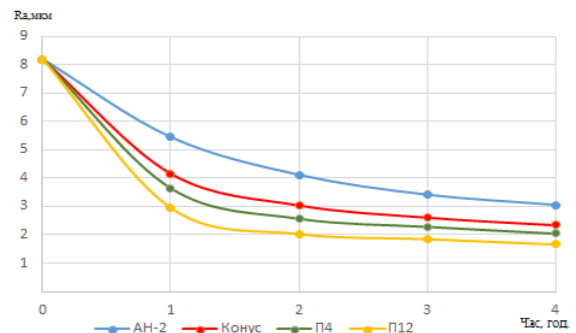
Рис. 4. Залежності шорсткості поверхонь сталевих зразків від часу обробки та форми інструменту

Розглянемо детально зміни шорсткості поверхні зразків після віброшліфування в робочих середовищах, що склалися з гранул різних форм.

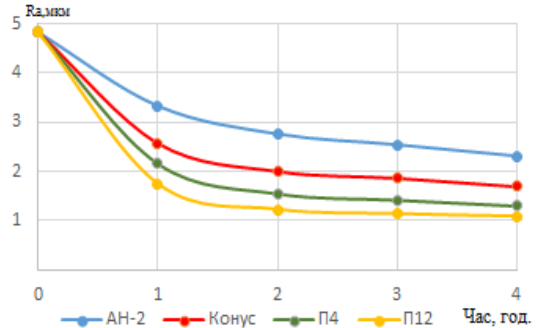
На підставі проведених досліджень встановлено, що середнє значення шорсткості поверхонь R_a для зразків зі сталі, дюралюмінієвого сплаву та латуні зменшується по параболічній залежності. Шорсткість у сталевих зразків в перші 2 години зменшується в середньому в гранулах АН-2 2,13 рази. При

цьому в гранулах певної геометричної форми, а саме конусах, П4 та П12 ця різниця шорсткості більша, а саме в 2,58, 2,9 та 3,7 рази співвідносно. Те саме спостерігається й при обробці зразків а дюралюмінію на латуні. При обробці латуні в АН-2 спостерігається стале зменшення шорсткості за перші 2 години віброшліфування в 2 рази при тому, що в конусах, П4 та П12 в 2,46, 2,76 та 3,52 рази співвідносно. Для латуні ці ж показники складають: при обробці в АН-2 зменшення шорсткості в 1,78 рази, в конусах – в 2,39 рази, П4 – в 2,92 рази та в П12 в 3,54 рази.

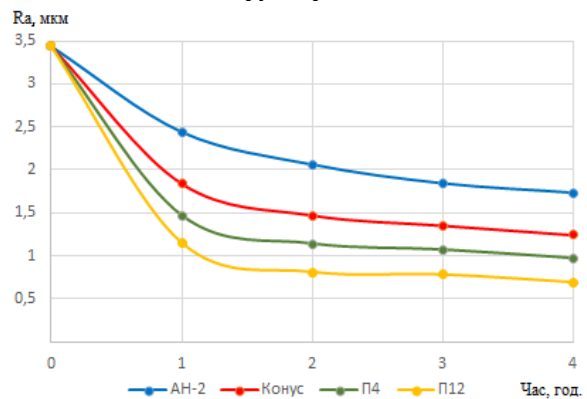
Далі для сталі та дюралюмінію відбувається поступове зменшення шорсткості поверхні в середньому на 21,8% та 16,7 % за кожний наступну годину обробки.



4 група зразків



5 група зразків



6 група зразків

Рис. 5. Залежності шорсткості поверхонь латунних зразків від часу обробки та форми інструменту

Таблиця 3

Середні значення шорсткості поверхонь R_a (мкм) зразків із латуні ЛС59-1 після їх вібраційного шліфування в різних робочих середовищах

Час обробки, год.	Форма гранул			
	АН-2	Конус	П4	П12
Прокат (4 група)				
1	5,45	4,16	3,65	2,95
2	4,12	3,04	2,58	2,03
3	3,42	2,61	2,29	1,85
4	3,06	2,34	2,05	1,66
Чорнове точіння (5 група)				
1	3,33	2,57	2,16	1,74
2	2,76	2	1,55	1,22
3	2,54	1,86	1,42	1,13
4	2,42	1,78	1,38	1,08
Чистове точіння (6 група)				
1	2,44	1,84	1,47	1,15
2	2,06	1,47	1,14	0,81
3	1,84	1,35	1,07	0,78
4	1,73	1,24	0,97	0,69

Таблиця 4

Середні значення шорсткості поверхонь R_a (мкм) зразків із дюралюмінієвого сплаву Д16 після їх вібраційного шліфування в різних робочих середовищах

Час обробки, год.	Абразивні гранули			
	АН-2	Конус	П4	П12
Прокат (7 група)				
1	13,01	10,05	8,27	6,54
2	9,49	6,73	5,36	3,75
3	6,92	4,98	4,12	2,86
4	5,36	3,72	2,85	2,04
Чорнове точіння (8 група)				
1	6,41	5,78	5,11	4,08
2	4,98	4,29	3,45	2,55
3	4,44	3,71	2,93	2,08
4	4,16	3,34	2,65	1,86
Чистове точіння (9 група)				
1	4,54	3,89	3,16	2,52
2	3,6	2,85	2,15	1,57
3	3,15	2,44	1,85	1,3
4	2,83	2,18	1,65	1,15

Для зразків з латуні також відбувається зменшення шорсткості за кожну наступну годину віброшліфування на 13,3% та 9,5 % співвідносно за 3 та 4 годину обробки.

При цьому спостерігається сталий процес зменшення значень шорсткості в залежності від форми інструменту. Так в гранулах в формі П12 після 4 годин віброшліфування були отримані найменші значення при однакових умовах обробки. Для зразків зі сталі Ст 3 з станом поверхонь – після гарячого прокату ці значення склали 2,34 мкм. Для зразків з того ж матеріалу після чорнового та чистового точіння – 2,21 мкм та 1,2 мкм співвідносно. При цьому зразки, що були оброблені в АН-2, конусах та П4 показали гірші результати шорсткості. Так значення шорсткості по зрівнянню з П12 були меншими в середньому

для АН-2 на 41,5%, для конусів на 30% та для П4 на 21,3% співвідносно. Для зразків з інших досліджуваних матеріалів результат був подібним.

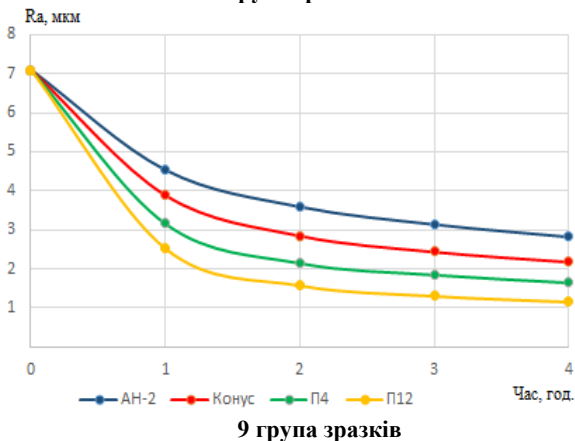
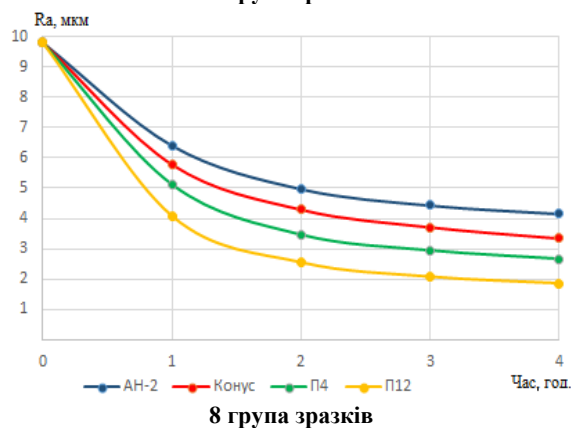
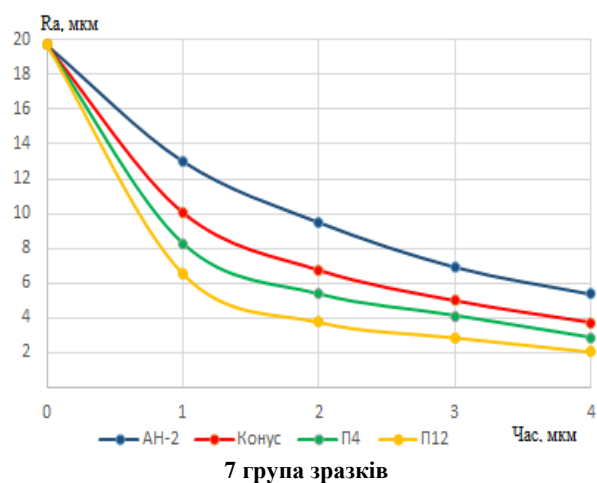


Рис. 6. Залежності шорсткості поверхонь дюралюмінієвих зразків від часу обробки та форми інструменту

Таким чином, для всіх досліджуваних матеріалів використання абразивних гранул з великою кількістю різальних крайок (ребер гранули), а саме гранул у формі П12, при інших рівних умовах, веде до зниження шорсткості оброблювальних поверхонь незалежно від їх початкового стану.

Приклади профілограм поверхонь зразків із сталі Ст3 після різних методів обробки представлені на рис. 7.

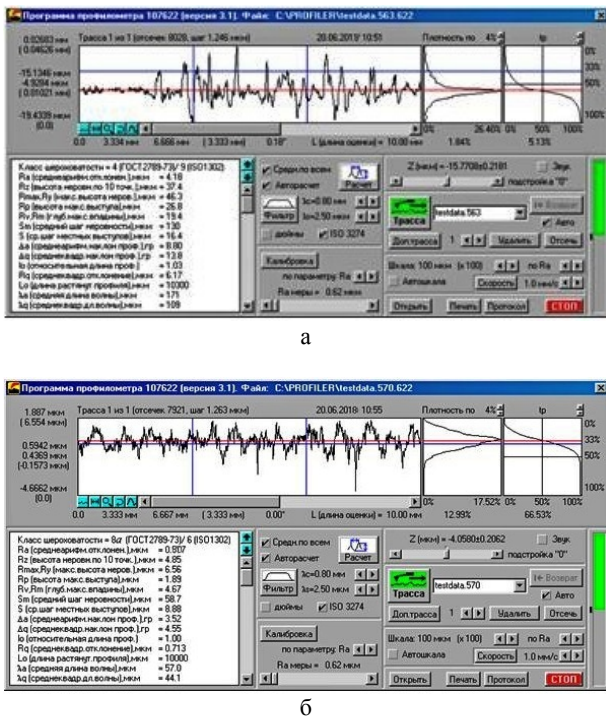


Рис. 7. Приклади профілограм поверхонь зразків: а – 1 групи після 3 годин вібраційного шліфування в П4 ($R_a=4,18$ мкм); б – 6 групи після 2 годин вібраційного шліфування в П12 ($R_a=0,81$ мкм)

Зовнішній вигляд поверхонь зразків в стані поставки (прокат), після точіння та після віброшліфування показаний на рис. 8-10.

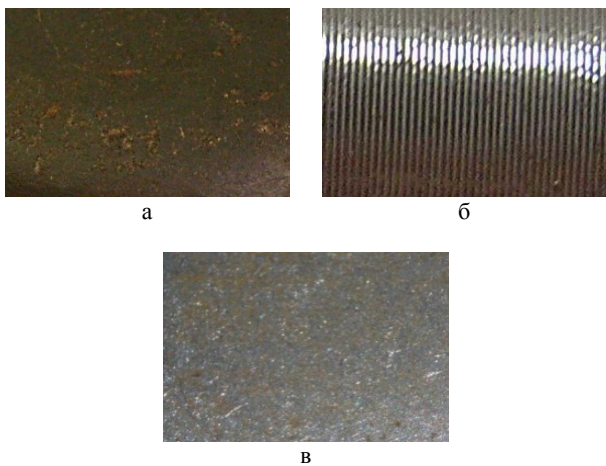


Рис. 8. Зовнішній вигляд поверхонь сталевих зразків: а – гарячекатаний прокат; б – після точіння; в – після вібраційного шліфування

Візуальний огляд зразків після 4 годин вібраційного шліфування показав, що поверхні всіх зразків мають помірно блискучий вигляд з високою однорідністю параметрів якості поверхні, гострі кромки скруглилися, не спостерігаються сліди іржі, забойн, вм'ятин та лезового інструменту, що залишилися після попередніх обробок. Шорсткість поверхневого шару зразків після вібраційного шліфування поліпилася більш ніж на два класи.

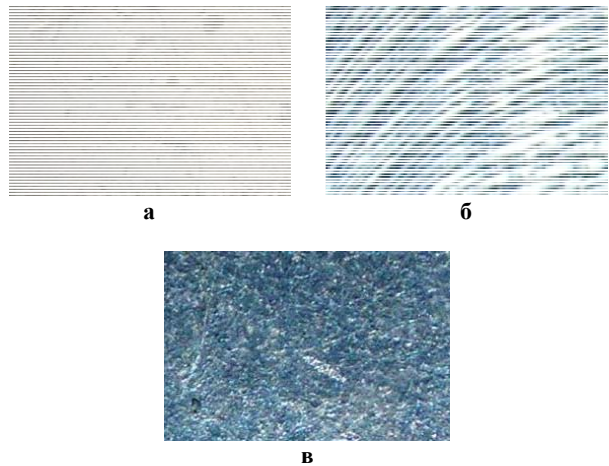


Рис. 9. Зовнішній вигляд поверхонь дюралюмінієвих зразків: а – калібрований прокат; б – після точіння; в – після вібраційного шліфування

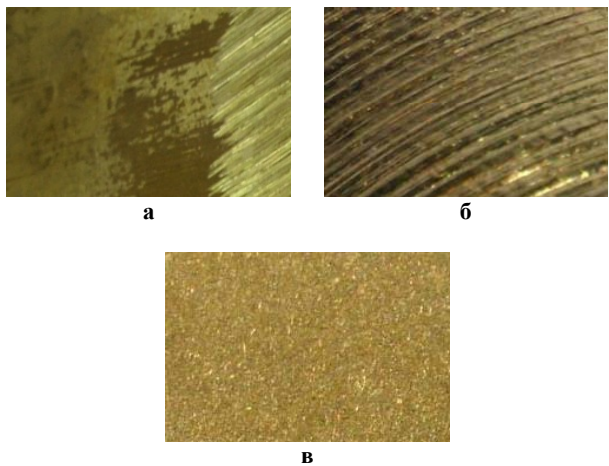


Рис. 10. Зовнішній вигляд поверхонь латунних зразків: а – калібрований прокат; б – після точіння; в – після вібраційного шліфування

Висновки:

1. Аналіз існуючих математичних залежностей показав, що з причина багатofакторності процесу, на сьогодні всі моделі носять емпіричний характер і потребують експериментального визначення великої кількості коефіцієнтів для уточнення умов процесу вібраційної обробки. Встановлено, що теперішній час немає жодної математичної моделі, яка показує вплив на шорсткість оброблювальних вібраційним методом деталей форми абразивних гранул.

2. Експериментально доведено, що використання вібраційної обробки в середовищі вільних абразивів сприяє, за рахунок багатократного нанесення мікроударів гранулами робочого середовища, поліпшенню якості оброблювальних поверхонь деталей із сталі Ст3, дюралюмінієвого сплаву Д16 та латуні ЛС59-1.

3. В ході експериментів доведено, що найбільш ефективним інструментом для зменшення шорсткості поверхонь деталей при вібраційному шліфуванні є абразивні гранули в формі двосторонніх пірамід

поперечному перерізі яких лежить неопуклий шестикутник – П12. Шорсткість поверхонь зразків, що оброблені в П12 була нижчою ніж при обробці таких же зразків в гранулах довільної форми АН-2 на 41,5%, в гранулах в формі конусів на 30% та в гранулах П4 на 21,3% співвідносно.

4. Використання в якості інструменту гранул в формі П12 сприяє скорочення операційного часу і підвищення продуктивності вібраційної обробки деталей, незалежно від їх матеріалу і початкової шорсткості.

Література

1. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах / И.Н. Карташов, М.Е. Шаинский, В.А. Власов, Б.П. Румянцев и др. - К.: Высшая школа, 1975. – 179 с.
2. Мицько А.В. Пути интенсификации вибрационной отделочно-зачистной обработки комбинированием схем энергетических воздействий на рабочую среду и детали / А.В. Мицько, В.А. Федорович // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2011. – № 6 (83). – С. 26 – 34.
3. Мицько А.В., Федорович В.А. Процесс отделочно-зачистной виброобработки и параметры, влияющие на его производительность // *Резание и инструменты в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. / Под общ. ред. проф. А.И. Грабченко*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 184 – 194.
4. Шумакова Т.А. К вопросу исследования процесса съема металла при вибрационной обработке / Т.А. Шумакова // *Науковий міжнародний журнал «ScienceRise»* – 2014. – №5/2(5). – С. 49 –54. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.32108>
5. Бойко М.А. Повышение технологических характеристик абразивных гранул для виброабразивной обработки: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Бойко Марина Александровна. – Ростов н/Д, 2000. – 165 с.
6. Шумакова Т.А. Исследование влияния на производительность процесса виброобработки основных факторов / Т.А. Шумакова // *Журнал «Технологический аудит и резервы производства»*. – 2014. – №6/1(20). – С. 4-8 DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.34768>
7. Калмыков М.А. Поведение рабочей среды в контейнерах вибрационных станков / М.А. Калмыков, С.Н. Ясуник, А.В. Романченко // *Вібрації в техніці і технологіях*. – 2010. – № 3 (59). – С. 38 – 42.
8. Рожненко О.А. Повышение эффективности обработки фасонных поверхностей деталей свободным абразивом: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Рожненко Оксана Анатольевна. – Ростов н/Д, 2010. – 168 с.
9. Иванов В.В. Процессы и методология создания поверхностных слоев высокоресурсных изделий путем вибрационного формирования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.07; 05.02.08 / Иванов Владимир Витальевич. – Ростов н/Д, 2017. – 351 с.
10. Кожухова А.В. Повышение эффективности и оптимизация процесса вибрационной обработки деталей за счет применения новых экологически чистых абразивных и смазочно-охлаждающих технологических сред: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Кожухова Александра Валерьевна. – Ростов н/Д, 2000. – 215 с.
11. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501609>.
12. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_37.
13. Sokolov, V., Krol, O.: Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In.: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 364-373. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_38.
14. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Gear Clutch with Modified Tooth Profiles. *Procedia Engineering*. 2017. – №206. P. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>
15. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre/Teka Komisji Motoryzacji I Energetyki in Rolnictwa. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 114–119.
17. Шумакова Т.А. Повышение производительности технологических процессов вибрационной обработки деталей / Т.А. Шумакова, А.П. Николаенко, А.В. Романченко, Т.Я. Таванюк // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. – №7 (237). – 2017. – С.139-149.
18. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов-на-Дону: издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с.
19. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке / *Вібрації в техніці та технологіях* №2 (58). – Вінницький національний аграрний університет, 2010 – С. 167-184.
20. Литовка Г.В. Вероятностно-статистическая система геометрических параметров гранул абразивного наполнителя как научная основа управления показателями вибрационной обработки: дис... доктора техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Литовка Геннадий Васильевич. – Благовещенск, 1996. – 364 с.
21. Тмаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08 / Тмаркин Михаил Аркадьевич. – Ростов н/Д, 1995. – 298 с.
22. Сердюков В.С. Многоступенчатая вибрационная обработка деталей из латуни / В.С. Сердюков // *Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология*. – 1982. – С.161 – 163.
23. Бабичев А.П. Пути оптимизации и управления параметров шероховатости поверхности при вибрационной обработке / А.П. Бабичев, М.А. Тмаркин, С.Н. Шевцов // *Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами деталей машин»*. – Ч. 11. – Киев. – 1980. – С. 17 – 20.
24. Левенгарц В.Л. Исследование динамики и совершенствование устройств для вибрационной обработки деталей: автореф. дис. на соискание науч. степени. канд. техн. наук: 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.Л. Левенгарц. – Каунас, 1981. – 28 с.

25. Шумакова Т.А. Влияние формы абразивных гранул на производительность процесса вибрационной обработки / Т.А. Шумакова, Е.П. Мельникова, И.А. Чесноков // Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. Випуск №2 (58) – 2010. – С. 219-233.
26. Лубенська Л.М. Основи вібраційної технології: Навчальний посібник. / Лубенська Л.М., Калмиков М.О., Ясунік С.М. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2009. – 284 с.

References

1. Kartashov, I. N., Shainskij, M. E. and Vlasov, V. A. (1975), *Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibrirujushhix rezervuarah* [Free abrasives treatment of details in vibrating tanks], Vysshaja shkola, Kiev, Ukraine.
2. Mitsiyk A.V. Puti intensivatsii vibratsionnoy otdelochno-zachistnoy obrabotki kombinirovaniem shem energeticheskikh vozdeystviy na rabochuyu sredu i detali / A.V. Mitsiyk, V.A. Fedorovich // Avlatslyno-kosmichna tehnika I tehnologiya. – 2011. – # 6 (83). – S. 26 – 34.
3. Mitsiyk A.V., Fedorovich V.A. Protsess otdelochno-zachistnoy vibroobrabotki i parametry, vliyayushchie na ego proizvoditelnost // Rezanie i instrumentyi v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. / Pod obsch. red. prof. A.I. Grabchenko. – Harkov: NTU «HPI», 2013. – Vyip. 83. – S. 184 – 194.
4. Shumakova T.A. K voprosu issledovaniya protsessa s'ema metalla pri vibratsionnoy obrabotke / T.A. Shumakova // Naukoviy mlzharodniy zhurnal «ScienceRise» – 2014. – #5/2(5). – S. 49 –54. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.32108>
5. Boyko M.A. Povyishenie tehnologicheskikh karakteristik abrazivnykh granul dlya vibroabrazivnoy obrabotki: dis. ... kandidata tehn. nauk: 05.02.08 / Boyko Marina Aleksandrovna. – Rostov n/D, 2000. – 165 s.
6. Shumakova T.A. Issledovanie vliyaniya na proizvoditelnost protsessa vibroobrabotki osnovnykh faktorov / T.A. Shumakova // Zhurnal «Tehnologicheskii audit i rezervyi proizvodstva». – 2014. – #6/1(20). – S. 4-8 DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.34768>
7. Kalmyikov M.A. Povedenie rabochey sredy v konteynerakh vibratsionnykh stankov / M.A. Kalmyikov, S.N. Yasunik, A.V. Romanchenko // VІbratsiyi v tehnitsi I tehnologiyah. – 2010. – # 3 (59). – S. 38 – 42.
8. Rozhnenko O.A. Povyishenie effektivnosti obrabotki fazonnykh poverhnostey detaley svobodnyim abrazivom: dis. ... kandidata tehn. nauk: 05.02.08 / Rozhnenko Oksana Anatolevna. – Rostov n/D, 2010. – 168 s.
9. Ivanov V.V. Protsessyi i metodologiya sozdaniya poverhnostnykh sloev vyisokoresursnykh izdeliy putem vibratsionnogo formirovaniya pokrytiy kombinirovannym himiko-mehancheskim vozdeystviem: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.02.07; 05.02.08 / Ivanov Vladimir Vitalevich. – Rostov n/D, 2017. – 351 s.
10. Kozhuhova A.V. Povyishenie effektivnosti i optimizatsiya protsessa vibratsionnoy obrabotki detaley za schet primeneniya novykh ekologicheskikh chistykh abrazivnykh i smazochno-ohlazhdayushchikh tehnologicheskikh sred: dis. ... kandidata tehn. nauk: 05.02.08 / Kozhuhova Aleksandra Valerevna. – Rostov n/D, 2000. – 215 s.
11. Sokolov, V., Krol, O., Stepanova, O.: Automatic Control System for Electrohydraulic Drive of Production Equipment. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE (2018). DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501609>.
12. Sokolov, V.: Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 63, pp. 278-283. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-04792-4_37.
13. Sokolov, V., Krol, O.: Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 364-373. Springer, Cham (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_38.
14. Shevchenko S., Muhovaty A., Krol O. Gear Clutch with Modified Tooth Profiles. Procedia Engineering. 2017. – №206. P. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>
15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.581>
16. Krol O., Sukhorutchenko I. 3D-modeling and optimization spindle's node machining centre/Teka Komisji Motoryzacji I Energetyki in Rolnictwa. – OL PAN, 2013, Vol.13, is.3, Lublin, Poland. – P. 114–119.
17. Shumakova T.A. Povyishenie proizvoditelnosti tehnologicheskikh protsessov vibratsionnoy obrabotki detaley / T.A. Shumakova, A.P. Nikolaenko, A.V. Romanchenko, T.Ya. Tavanyuk // VІsnik ShldnoukraYinskogo natslionalnogo unIversitetu Im. V. Dalya. – #7 (237). – 2017. – S.139-149.
18. Babichev A.P. Osnovy vibratsionnoy tehnologii / A.P. Babichev, I.A. Babichev, – Rostov-na-Donu: izdatelskiy tsentr DGTU, 2008. – 694 s.
19. Nikolaenko A.P. Formirovanie poverhnosti izdeliya pri vibratsionnoy obrabotke /VІbratsiyi v tehnitsi ta tehnologiyah #2 (58). – VІnnitskiy natslionalniy agrarniy unIversitet, 2010 – S. 167-184.
20. Litovka G.V. Veroyatnostno-statisticheskaya sistema geometricheskikh parametrov granul abrazivnogo napolnitelya kak nauchnaya osnova upravleniya pokazatelyami vibratsionnoy obrabotki: dis... doktora tehn. nauk: 05.02.08; 05.03.01 / Litovka Gennadiy Vasilevich. – Blagoveschensk, 1996. – 364 s.
21. Tamarkin M.A. Teoreticheskie osnovyi optimizatsii protsessov obrabotki detaley svobodnyimi abrazivami: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.02.08 / Tamarkin Mihail Arkadevich. – Rostov n/D, 1995. – 298 s.
22. Serdyukov V.S. Mnogostupenchataya vibratsionnaya obrabotka detaley iz latuni / V.S. Serdyukov // Progressivnaya otdelochno-uprochnyayushchaya tehnologiya. – 1982. – S.161 – 163.
23. Babichev A.P. Puti optimizatsii i upravleniya parametrov sherohovatosti poverhnosti pri vibratsionnoy obrabotke / A.P. Babichev, M.A. Tamarkin, S.N. Shevtsov // Tezisy dokladov Vsesoyuznoy konferentsii «Tehnologicheskoe upravlenie kachestvom obrabotki i ekspluatatsionnymi svoystvami detaley mashin». – Ch. 11. – Kiev. – 1980. – S. 17 – 20.
24. Levorgarts V.L. Issledovanie dinamiki i sovershenstvovanie ustroystv dlya vibratsionnoy obrabotki detaley: avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni. kand. tehn. nauk: 05.02.08 «Tehnologiya mashinostroeniya» / V.L. Levorgarts. – Kaunas, 1981. – 28 s.

25. Shumakova T.A. Vliyaniye formy i abrazivnykh granул na proizvoditel'nost protsessа vibratsionnoy obrabotki / T.A. Shumakova, E.P. Melnikova, I.A. Chesnokov // VІbratsiYі v tehnІtsі ta tehnologiyah. VseukraYіnskiy naukovо-tehnІchniy zhurnal. Vіpusk #2 (58) – 2010. – S. 219-233.
26. Lubenska, L.M., Kalmikov, M.O., Iasunik, S.M. (2009), Osnovi vibratsiinoї tekhnologii: Navchalnii posibnik [Basics of vibration nechnology: Tutorial], Vid-vo SNU im. V. Dalia, Lugansk, Ukraine.

Шумакова Т.А., Николаенко А.П., Романченко А.В., Таванюк Т.Я., Логунов А.Н. Исследование влияния геометрических параметров абразивной гранул на шероховатость поверхностей деталей при вибрационной обработке.

В статье проведен анализ существующих математических зависимостей, который показал, что из-за многофакторности процесса вибрационной обработки, модели носят эмпирический характер и требуют экспериментального определения большого количества коэффициентов для уточнения условий процесса обработки. Экспериментально установлено, что использование вибрационной обработки способствует улучшению качества обрабатываемых поверхностей деталей из стали Ст3, дюралюминиевого сплава Д16 и латуни ЛС59-1. Доказано, что наиболее эффективным инструментом для уменьшения шероховатости поверхностей деталей при вибрационном шлифовании являются абразивные гранулы в форме двусторонних пирамид в поперечном сечении которых лежат невыпуклые шестиугольник - П12.

Ключевые слова: вибрационная обработка, абразивная гранула, шероховатость поверхности, вибрационное шлифование, повышение эффективности, операционное время.

Shumakova T., Nikolaenko A., Romanchenko A., Tavanyuk T., Logunov O.

Research of the effect of abrasive granules geometrical parameters on roughness of parts surface with vibration treatment.

The theoretical analyzes of existing mathematical dependencies which showed that due to multifactorial nature of vibration treatment the models have empirical nature and require experimental determination of large number of coefficients to define conditions of treatment process has been done. Improvement of quality of parts surface made of steel St3, duralumin alloy D16, and brass LS59-1 by application of vibration treatment has been set. Application of abrasive granules in form of bilateral pyramids in cross section of which lies a non-convex hexagon - P12 as the most effective tool for reducing of roughness of parts surface during vibration grinding has been proved.

Keywords: vibration treatment, abrasive granule, surface roughness, vibration grinding, efficiency increase, operating time.

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) shumakovatania@gmail.com

Ніколаєнко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) annikolaenko@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) alexvromanchenko@gmail.com

Таванюк Тетяна Яківна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) ttavanyuk@gmail.com

Логунов Олександр Миколайович – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Северодонецьк) logunov@ukr.net

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 15.02.2019.

УДК 004.896

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ ВИТРАТАМИ ПІДПРИЄМСТВА

Шумова Л.О., Пчелинська Г.В.

INFORMATION TECHNOLOGIES TO SUPPORT DECISION FOR A MANAGEMENT BY THE COSTS OF ENTERPRISE

Shumova L., Pchelinska H.

У статті розглядаються актуальні завдання інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень з оперативного управління витратами підприємства.

Ключові слова: інформаційні технології, підтримка прийняття рішень, управління витратами підприємства, моделювання слабоструктурованих задач.

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси вітчизняної економіки супроводжуються посиленням чинників зростання витрат підприємств - загостренням конкуренції з боку іноземних компаній, зростанням цін на основні ресурси виробництва, високим рівнем інфляції, значними коливаннями обмінних курсів валют, подорожчанням кредитних ресурсів тощо. Такі умови господарювання підвищують роль аналітичного забезпечення процесу прийняття управлінських рішень щодо вибору альтернатив в оцінці витрат. Не менш важливим є інформаційне забезпечення розглянутих процесів прийняття рішень. Аналіз інформаційних масивів вихідних даних і результатів свідчить не тільки про їхню багаточисленність і різноманітність, робота з якими вимагає використання фундаментальних і прикладних наук, а й часткової невизначеності (кількісної та інформативної), що вимагає залучення засобів математичного моделювання та додаткових знань для прийняття коректних рішень. До того ж деякі вихідні дані носять не кількісний, а якісний характер, що створює додаткові труднощі пошуку оптимальних рішень. Тому вибір моделі і методу аналізу для формалізації змістовного обґрунтування рішення, їх реалізація в інформаційно-аналітичній технології та створення інформаційної системи підтримки прийняття рішень з управління витратами підприємства сьогодні набуває особливої актуальності.

Метою дослідження є підвищення ефективності прийняття рішень з управління витратами підприємства [1].

Методика дослідження. Підготовка прийняття управлінських рішень в багатьох відносинах є знаходження ефективних компромісів, коли виграв по одному критерію призводить до програшу по іншим [2]. Проблема процесу прийняття рішення в умовах можливих негативних наслідків полягає в зіставленні мінусів конкретного рішення з його плюсами з метою отримання найбільшого загального виграву. Коли вибираються критерії для прийняття рішення, негативні наслідки слід трактувати і використовувати як обмеження.

Хід рішення можна розглядати як виконання взаємопов'язаного набору етапів та підетапів процесу рішення. У кожному конкретному випадку цей процес буде природно уточнено і індивідуалізовано.

Основним напрямком удосконалення процесу прийняття управлінських рішень є автоматизація процесів управління виробництвом на основі створення інтегрованої автоматизованої інформаційної системи моделювання виробничого процесу. Основним завданням даної системи є своєчасне забезпечення менеджера необхідною і точною інформацією, на основі якої стає можливим детальне передбачення і аналіз наслідків прийняття окремих управлінських рішень.

Застосування комп'ютерних засобів для зберігання і обробки інформації і використання імітаційних моделей дозволяє спрогнозувати можливу поведінку керованої виробничої системи. Внаслідок цього змінюється структура самого процесу прийняття рішень. З використанням системи моделювання та інформації про поточний стан виробничої системи проводиться оцінка різних варіантів рішень. На основі отриманої інформації і власного досвіду менеджер приймає остаточне рішення, яке потім буде реалізовано на практиці. Подібна схема прийняття рішень найбільш ефективна в сучасних умовах, оскільки дозволяє істотно прискорити процес прийняття рішення завдяки використанню інформаційно-

аналітичних засобів підтримки прийняття управлінських рішень [3]. При розробці цих засобів передбачається повне використання професійного досвіду, знань, інтуїції особи, що приймає рішення.

Ефективне управління сьогодні неодмінно вимагає від керівників стратегічного мислення та вміння формувати, розробляти стратегію і, головне, успішно реалізовувати її. Серед існуючих методів прийняття рішення з управління підприємством немає універсального методу. Серед існуючого програмного забезпечення немає такого, яке могло б остаточно вирішити проблему прийняття рішень з оперативного управління витратами підприємства [1].

Математична модель задачі прийняття рішення представлена у вигляді наступного набору інформації (1).

$$\langle T, X, R, A, F, G, D \rangle, \quad (1)$$

де T – постановка задачі вибору рішення;

X – множина допустимих альтернатив;

R – множина критеріїв вибору;

A – множина шкал вимірювань за критеріями (порядкові, інтервальні, відношень, найменувань);

F – відображення множини допустимих альтернатив на множину критеріальних оцінок (наслідки рішень);

G – система переваг особи, що приймає рішення;

D – правило, що відображає систему переваг ОПР.

Математичні постановки задач прийняття рішень можуть суттєво відрізняються одна від одної.

З формальної точки зору процедуру прийняття рішення у загальному випадку можна сформулювати наступним чином (2).

$$\{X, F\} \rightarrow X^*, \quad (2)$$

де X – початкова множина альтернатив;

F – функція, що визначає правило вибору рішення;

X^* – обрана підмножина варіантів.

З безлічі відомих методів та підходів до прийняття рішень найбільший інтерес для вирішення даної задачі представляють ті, які дають можливість враховувати багатокритеріальність та невизначеність, а також дозволяють здійснювати вибір рішень з множин альтернатив різного типу при наявності критеріїв, що мають різні типи шкал вимірювання.

Існує ряд підходів до опису процесу вибору рішення, зокрема: критеріальний підхід; опис за допомогою бінарних відношень; груповий вибір; вибір як результат розв'язку задачі оптимального управління [4].

Найбільш поширені засоби розв'язання багатокритеріальних задач прийняття рішень: метод скаляризації, метод умовної мінімізації, метод поступових поступок, пошук множини Парето [4].

Процес прийняття рішення визначається значною мірою чіткістю його структури. Для вирішення слабоструктурованих задач та для задач з великою невизначеністю використовуються неформальні методи: мозкова атака або колективна генерація ідей, метод сценаріїв, експертні оцінки, метод Дельфи, дерево цілей, морфологічні методи, метод вирішальних матриць [4].

Актуальним напрямком в моделюванні інтелектуальних умінь людини успішно приймати рішення в різних умовах невизначеності, завдяки інтуїції і знань, є знання-орієнтовані методи.

В цьому напрямку професором І.Б. Сіроджа [5] запропонований квантовий підхід до інженерії знань, реалізований за допомогою розробленого методу різномірних алгоритмічних квантів знань для прийняття ідентифікаційних і прогнозних рішень в умовах невизначеності.

Ідея квантового підходу полягає в новій формалізованій структуризації (автоматичному квантуванні) інформації для комп'ютерного відтворення умовиводів і міркувань засобами математичної логіки і теорії алгоритмів. Модель квантових мереж виведення рішень (КМВР) являє собою модель логічних міркувань аналітика від посилок через проміжні слідства до цільових наслідків, тобто прийнятих рішень. Кванти знань в вузлах КМВР являють собою не тільки своєрідні процесори з вбудованими алгоритмами для переробки вхідної інформації (посилок) в вихідну (наслідок) з визначенням його показника достовірності, а й спеціальні векторно-матричні структури (порції) даних про об'єкт управління.

Для реалізації інформаційної технології підтримки прийняття рішень з оперативного управління витратами підприємства обрано метод інженерії квантів знань і модель КМВР. Така модель враховує весь досвід фахівця з даної області незалежно від математичного апарату.

Загальна схема квантового підходу представлена на рисунку 1.

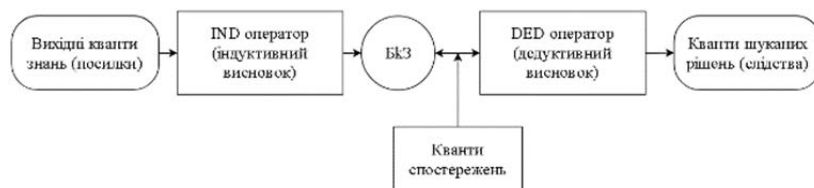


Рис. 1. Загальна концептуальна схема інженерії квантів знань

Спочатку будується база квантів знань (БкЗ) як система імплікативних і/або функціональних закономірностей для конкретної предметної області за допомогою індуктивного виведення з вибірових навчальних квантів знань в формі таблиць емпіричних даних і сценарних прикладів навчальних знань. Шукані рішення (слідства) у формі нових квантів знань дедуктивно виводяться з БкЗ по спостережуваним квантам знань (посилки).

Автоматичне квантування різнотипової інформації і машинне маніпулювання квантами знань забезпечується алгоритмічними і операційними засобами методу різнорівневих алгоритмічних квантів

знань для прийняття ідентифікаційних і прогностичних рішень в умовах невизначеності [5].

На підставі методу різнорівневих алгоритмічних квантів знань розроблена інформаційно-аналітична технологія вибору оптимальних з точки зору стратегії підприємства елементів оцінки його витрат.

Мета вирішення проблеми – вибрати оптимальну комбінацію альтернативних рішень щодо оцінки витрат згідно прийнятої на підприємстві стратегії діяльності.

На рисунку 2 відображено послідовність прийняття рішення щодо вибору альтернативних параметрів та методів оцінки витрат підприємства.

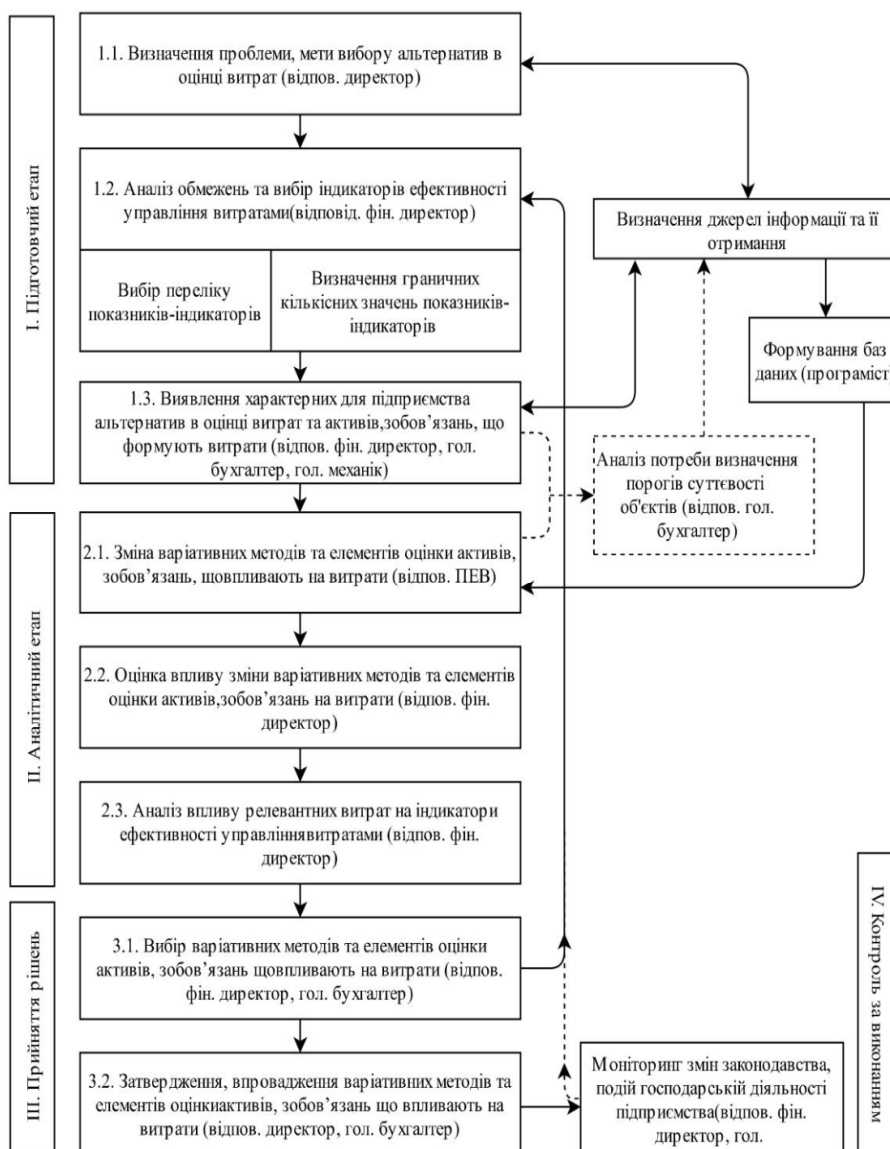


Рис. 2. Послідовність прийняття рішення щодо вибору альтернативних параметрів та методів оцінки витрат підприємства

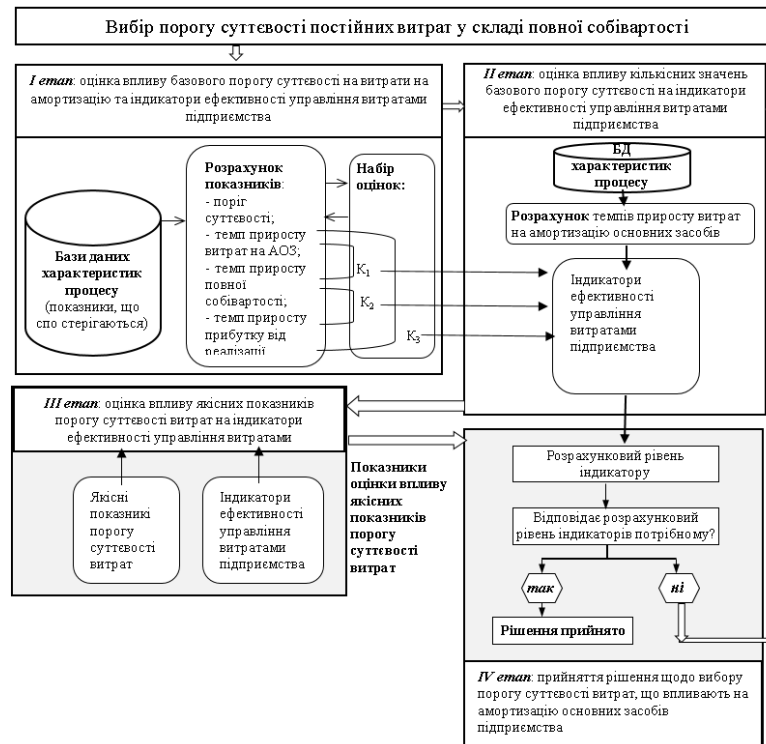


Рис. 3. Схема інформаційного забезпечення прийняття рішення щодо визначення порогу суттєвості постійних витрат у складі повної собівартості

Задача прийняття рішення – знайти компромісне рішення щодо визначення порогу суттєвості постійних витрат у складі повної собівартості. При цьому задача прийняття раціонального рішення зводиться до задачі багатокритеріальної оптимізації, тобто до пошуку компромісного рішення, яке в певній мірі задовольняє декільком критеріям вибору.

Тому далі детальніше розглянуто задачу інформаційного забезпечення прийняття рішення щодо визначення порогу суттєвості постійних витрат у складі повної собівартості (рис. 3).

Практична цінність отриманих результатів полягає в створенні обґрунтованих пропозицій моделей, програм і практичних рекомендацій для комп'ютерної підтримки прийняття управлінських рішень з управління витратами підприємства.

Висновки. 1. Проаналізовані підходи до інформаційної підтримки прийняття рішень з управління підприємством.

2. На основі аналізу предметної області визначено основні фактори, що впливають на прийняття рішень з управління витратами підприємства.

3. Для розробки інформаційної технології підтримки прийняття рішення з управління витратами підприємства обґрунтовано використання концепції інженерії квантів знань.

4. Розроблена інформаційна технологія підтримки прийняття рішень з оперативного управління витратами підприємства на основі різноманітних даних.

Література

1. Шумова Л.А., Пчелинская А.В., Цебренок А.С. Модели и методы информационно-аналитической поддержки принятия решения по управлению расходами предприятия. // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: Материалы международной научной конференции – Херсон: Видавництво ФЛП Вишемирський, 2018. – С. 209-210.
2. Теорія прийняття рішень [текст] підручник. / за ред. М. П. Бутка [Бутко М. П., Бутко І. М., Машенко В. П. та ін.] - К. : «Центр учбової літератури», 2015.- 360 с.
3. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / [R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn and other]. – Berlin : Springer, 2013. – 488 p.
4. Модели й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 300 с.
5. Сироджа И.Б. Принятие решений в управлении знаниями средствами инженерии квантов знаний // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2009. – № 2(36). – С. 161–175.

References

1. Shumova L.A., Pchelinskaya A.V., Tsebrenko A.C. Modeli i metody informatsionno-analiticheskoy podderzhki prinyatiya resheniya po upravleniyu raskhodami predpriyatiya. // Intellektual'nyye sistemy prinyatiya resheniy i problemy vychislitel'nogo intellekta: Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii – Kherson: Vidavnistvo FLP Vishemir's'kiy, 2018. – S. 209-210.
2. Teoriya prinyatiya rishen' [tekst] pidruchnyk. / za zah. red. M. P. Butka [Butko M.P., Butko I.M., Mashchenko V.P. ta in.] - K. : «Tsentr uchbovoi literatury», 2015.- 360 s.

V. P. ta in.] – K : «Tsentr uchbovoyi literatury», 2015. - 360 s.

3. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / [R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn and other]. – Berlin : Springer, 2013. – 488 p.
4. Modeli y metody pryunyattya rishen': navch. posib. / S.A. Us, L.S. Koryashkina; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. him. un-t. – D. : NHU, 2014. – 300 s.
5. Sirodzhia I.B. Prinyatiye resheniy v upravlenii znaniyami sredstvami inzhenerii kvantov znaniy // Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy. – 2009. – № 2(36). – S. 161–175.

Шумова Л.А., Пчелинская А.В. Информационные технологии поддержки принятия решений по управлению расходами предприятия

В статье рассматриваются актуальные задачи информационно-аналитической поддержки принятия решений по оперативному управлению расходами предприятия.

Ключевые слова: *информационные технологии, поддержка принятия решений, управление расходами предприятия, моделирование слабоструктурированных задач.*

Shumova L., Pchelinska H. Information technologies to support decision for a management by the costs of enterprise

Actual tasks of informational and analytical support for decision-making on the operational management of enterprise costs are discussed in the article.

Keywords: *information technology, decision support, enterprise cost management, modelling of poorly-structured problems.*

Шумова Лариса Олександрівна – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м.Сєверодонецьк) shumova@ukr.net

Пчелинская Ганна Володимирівна – старший викладач кафедри обліку і оподаткування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м.Сєверодонецьк) pchelinska2@gmail.com

Рецензент: д.т.н., д.е.н., проф. **Рамазанов С.К.**

Стаття подана 18.02.2019.

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 1 (249) 2019**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Соколов В.І.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 20.03.2019 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 16,9. Обл.-вид. арк. 18,3.
Наклад 300 прим. Вид. № 3215. Заказ № __. Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: просп. Центральний 59-А
м. Северодонецьк, 93400, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com

Надруковано у типографії Мадрид, ООО
Свідоцтво про реєстрацію: ДК № 4399 від 27.08.2012.
Адреса типографії: вул. Ольминського, 11,
м. Харків, 61024, Україна
e-mail: : info@madrid.in.ua