

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Костик Катерина Олександрівна

УДК 621.785.527/.532/.533/.539/.545

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОРОШКОВИМИ СУМІШАМИ КЕРОВАНОГО СКЛАДУ

05.02.08 – технологія машинобудування

13 – механічна інженерія
галузь знань

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ К. О. Костик

Науковий консультант
Акімов Олег Вікторович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Костик К.О. Наукові основи технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

У дисертаційній роботі проведено комплекс досліджень, спрямованих на вирішення важливої науково-технічної проблеми в області технології машинобудування: розробка інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу для забезпечення експлуатаційних властивостей виробів на високому рівні при значному зниженні затрат на їх виготовлення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці наукових основ інноваційних та короткотривалих технологій поверхневого зміцнення деталей машин порошковими сумішами керованого складу, що дозволило вирішити актуальну науково-практичну проблему підвищення терміну служби деталей машин та інструменту:

– вперше розраховано локальні максимуми поверхневої твердості та глибини дифузійних шарів сплавів і встановлено теоретичні оптимальні умови процесів дифузійного зміцнення, що дозволяє отримати конкретні технологічні параметри проведення хіміко-термічної обробки (ХТО) та забезпечити оптимальні характеристики дифузійних шарів;

– вперше створено математичні моделі та номограми існуючих технологій поверхневого зміцнення сталей, що дозволило визначити конкретні умови ХТО (температуру і тривалість), виходячи із заданої глибини дифузійного шару або поверхневої твердості сталей, що суттєво впливає на ефективність реалізації процесів зміцнення;

– вперше на основі використання інноваційних технологій і системного аналізу при мінімальних витратах, розроблено загальний методологічний підхід керування технологічними процесами поверхневого зміцнення деталей порошковими сумішами керованого складу при насиченні поверхневих шарів азотом, вуглецем і бором, це дозволило підвищити експлуатаційні властивості виробів при значному скороченні тривалості ХТО;

– набули подальшого розвитку розроблені комплексні ХТО, які значно знижують крихкість борованих шарів за рахунок більш плавного зниження твердості від поверхні до серцевини виробів зі сталей, що дозволило підвищити експлуатаційні властивості виробів та термін служби деталей машин та інструменту на відміну від відомих методів ХТО, які підвищують лише поверхневу твердість;

– вперше розроблено математичну модель розподілу температури за глибиною дифузійного шару, що дозволило визначити характер залежностей та отримати дані про розподіл температури за глибиною виробу при різних технологічних режимах обробки;

– удосконалено технологію борування з паст титанових сплавів за рахунок використання нанодисперсного насичувального середовища, що дозволило скоротити процес борування у 2-3 рази та скоротити технологічний процес виготовлення деталей за рахунок поєднання двох операцій: борування і гартування титанового сплаву;

– запропоновано розв'язання крайових задач дифузії методом граничних елементів, що дозволило вперше створити математичну модель розподілу концентрації бору за товщиною зміцненого шару титанового сплаву;

– удосконалено технологію інтенсифікації процесів ХТО методами нагрівання струмами високої частоти та за рахунок попередньої лазерної обробки деталей, що дозволило отримати високі експлуатаційні властивості поверхневих шарів при значному скороченні тривалості обробок.

Практичне значення роботи полягає у розробці технологій комбінованого зміцнення поверхневих шарів деталей зі сплавів.

На основі комплексу проведених теоретичних та експериментальних досліджень, сформульованих принципів, закономірностей і положень отримані наступні практичні результати:

1. Спосіб комбінованої обробки сталевих виробів, що включає попередню лазерну обробку поверхні матеріалу з потужністю лазерного випромінювання $-1,0 \pm 0,1$ кВт, швидкістю пересування лазерного променя $-0,5-1,5$ м/хв. з наступним азотуванням. Крім цього, азотування проводять в середовищі меламіну з 3-5% фтористого натрію при температурі 530-560 °С протягом 2-3 годин (патент України №111066).

2. Спосіб дифузійного борування сталевих виробів, що включає попереднє нанесення на поверхню обмазки, в склад якої входить боровмісна речовина, активатор фторид натрію і зв'язуюча речовина розчину клею БФ в ацетоні, і нагрівання струмами високої частоти. При цьому в обмазці як боровмісну речовину використовують поліборид магнію або аморфний бор і додатково введено активатор фторид літію (патент України №116177).

3. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих виробів, що включає нанесення на поверхню деталі обмазки, до складу якої входить боровмісна речовина і активатор, сушіння і нагрівання струмами високої частоти. В обмазці як боровмісну речовину використовують аморфний бор і активатор фторид літію. Нагрівання проводять при температурі 800-1100 °С протягом 1-5 хвилин (патент України №116178).

4. Спосіб отримання твердого покриття на поверхні сталевих виробів, що включає попередню обробку поверхні матеріалу та борування. Проводять попередню лазерну обробку поверхні матеріалу з наступним боруванням в середовищі полібориду магнію, активаторами: фтористий натрій і фтористий літій (патент України №116116).

5. Сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми, що містить: залізо, марганець, кремній, вуглець, хром, нікель, кобальт, мідь, ванадій, ніобій, молібден. При цьому до сплаву додатково введено сірку та фосфор (ваг. %): марганець від 4 до 20; кремній від 1,0 до 4,5; вуглець від 0,1 до 1,0; хром від 10,0

до 25,0; нікель від 1,0 до 10,0; кобальт від 1,0 до 10,0; мідь від 1,0 до 4,0; ванадій від 0,5 до 2,0; ніобій від 0,3 до 1,5; молібден від 0,5 до 2,0; сірка до 0,01; фосфор до 0,045; залізо решта (патент України №116117).

6. Склад для борування сталевих виробів, що містить аморфний бор, тетрафтороборат калію, нітрид бору і доломіт (патент України №117775).

7. Спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів, що включає насичення поверхневих шарів компонентами боровмісного середовища, до складу якого входить боровмісна речовина та активатор, і нагрівання. Насичення поверхневих шарів здійснюють компонентами боровмісного середовища, яке складається з аморфного бору і фториду літію (патент України №117770).

8. Дисперсійно-твердіючий сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми, що містить: залізо, марганець, кремній, вуглець, ванадій, ніобій, вольфрам. Додатково введено алюміній, мідь, нікель, хром, сірку та фосфор (патент України №117757).

9. Розроблені технологічні процеси ХТО були впроваджені для підвищення поверхневої твердості сталевих виробів на ТОВ «АСТИЛ М» (м. Харків), що дозволило підвищити зносостійкість втулки у 1,5 рази після нітроцементзації, у 4,3 рази після послідовній нітроцементзації та боруванні, у 5 разів після цементзації, нітроцементзації та боруванні та у 2 рази після боруванні з нагріванням СВЧ у порівнянні зі втулкою без поверхневого зміцнення (Акт впровадження від 05.10.2017 р.).

10. Розроблені технологічні процеси комбінованого зміцнення були впроваджені для підвищення поверхневої твердості сталевих виробів на ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» (м. Харків). Виробничими випробуваннями встановлено, що запропоновані ефективні технологічні процеси комбінованого зміцнення поверхневого шару сталевих виробів дозволили значно прискорити технологічні процеси хіміко-термічної обробки у 2-10 разів, що привело до зменшення витрат на їх проведення за рахунок економії електричної енергії (Акт впровадження від 17.10.2017 р.).

11. Розроблені технологічні процеси були впроваджені на ТОВ «НВЦ ЄТМ» (м. Харків), що дозволило підвищити зносостійкість втулки у 1,5 рази після нітроцементації, у 4,3 рази після послідовній нітроцементації та боруванні (Акт впровадження від 31.10.2017 р.).

12. Прийняті для впровадження в виробництві розроблені номограми, які дозволяють визначити конкретні умови газового азотування (температуру і тривалість) виходячи із заданої глибини азотованого шару або поверхневої твердості виробів зі сталі 38Х2МЮА на ПАТ «Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря» (м. Харків). Встановлено, що запропоновані номограми дозволили значно спростити роботу інженера-технолога, а також номограми дозволили вирішувати зворотну задачу, а саме, оцінити можливу товщину зміцненого шару і поверхневу твердість при одночасному впливі температури і тривалості газового азотування (Акт впровадження від 15.11.2017 р.).

13. Розроблений ефективний технологічний процес нітроцементації у порошковій макродисперсній суміші для підвищення експлуатаційної стійкості зубчастого колеса зі сталі 38Х2МЮА на АТ «Харківський тракторний завод» (м. Харків). Встановлено, що використання макродисперсної суміші прискорило процес хіміко-термічної обробки у 1,5-2 рази при отриманні властивостей поверхневого шару виробу таких, як і після традиційного процесу нітроцементації, що дозволило зменшити витрати на проведення хіміко-термічної обробки у 2 рази (Акт впровадження від 24.01.2018 р.).

14. Розробки, виконані в дисертації, впроваджені в навчальний процес для студентів механіко-технологічного факультету НТУ «ХП» спеціальностей 131 «Прикладна механіка» спеціалізації 131-09 «Обладнання та технології ливарного виробництва» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» спеціалізації 151-07 «Комп'ютеризовані системи управління технологічними процесами» (Акт впровадження від 20.12.2017 р.).

Ключові слова: процеси дифузійного насичення, математичне моделювання, зміцнююча комплексна обробка матеріалів, експлуатаційні властивості, поверхнева твердість, дифузійний шар, зносостійкість

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Костик К. О. Підвищення зносостійкості деталей прес-форм лиття під тиском методом борування з нанопаст // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2013. № 70(1043). С. 8–12.

2. Костик К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології // Проблеми машинобудування. 2013. № 5. С. 113–118.

3. Костик К. О. Підвищення довговічності деталей енергетичного машинобудування методом нітроцементації в макродисперсній суміші // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. академія МОНМС України. Харків, 2013. № 12. С. 50–55.

4. Костик В. О., Костик К. О., Долженко А. С. Поверхнєве зміцнення деталей автомашин та тракторів методом низькотемпературної нітроцементації в порошковому середовищі // Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. / Харк. нац. авт.-дорожн. ун-т. Харків, 2013. Вып. 33. С. 115–119.

5. Костик К. О. Інноваційний метод підвищення довговічності деталей машин хіміко-термічною обробкою // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2014. № 1/3(15). С. 20–21.

6. Костик В. О., Костик К. О. Вивчення зміни коефіцієнту дифузії вуглецю залежно від температури хіміко-термічної обробки сталі 20Х // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2014. № 38(1011). С. 21–29.

7. Костик К. О., Костик В. О. Моделювання глибини боридного шару сталі 4Х5МФС при зміні тривалості борування по нанотехнології // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2014. № 40(1083). С. 145–149.

8. Костик К. О., Костик В. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легованої сталі 30X3BA // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2014. № 48(1090). С. 21–41.

9. Пономаренко О. И., Костик Е. А., Федоров Г. Е. Изготовление отливок с дифференцированными свойствами поверхности // Компресорне і енергетичне машинобудування. 2015. № 4(42). С. 40–44.

10. Швидкісний метод нітроцементації легованої сталі / К. О. Костик, В. О. Костик, А. С. Долженко, С. В. Нікіфорова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2015. № 14(1123). С. 35–41.

11. Костик К. О. Зміцнення поверхні інструменту зі сталі 38X2МЮА комплексною хіміко-термічною обробкою сталі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2015. № 39(1148). С. 26–33.

12. Kostyk K. O. Research of influence of gas nitriding duration on formation of diffusion layer of steel 20Kh2N4A // Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. праць / Одес. політехн. ун-т. Одесса, 2015. Вип. 2(46). С. 14–18. DOI : 10.15276/opus.2.46.2015.04

13. Костик К. О. Розробка швидкісної технології борування легованої сталі // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. № 6/11(78). С. 8–15. DOI : 10.15587/1729-4061.2015.55015 (Scopus)

14. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Nanodispersed boriding of titanium alloy // Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. Праць / Одес. політехн. ун-т. Одесса, 2015. Вип. 3(47). С. 17–23. DOI : 10.15276/opus.3.47.2015.04

15. Костик К. О. Розробка технології місцевого поверхневого зміцнення зубчатого циліндричного колеса відцентрованого змішувача // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2015. № 2. С. 39–43.

16. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. № 2/5(80). С. 45–49. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.65454 (**Scopus**)

17. The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel / W. Dhafer, V. Kostyk, K. Kostyk, A. Glotka, M. Chechel // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. № 3/5(81). С. 44–50. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.69809 (**Scopus**)

18. Влияние предварительной термической обработки и режимов лазерной закалки на структуроформирование стали / А. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2016. № 18(1190). С. 66–73. DOI : 10.20998/2413-4295.2016.18.10

19. Костик К. О. Поверхнєве двошарове зміцнення сталі при послідовному насиченні вуглецем та бором в порошкових макро-та нанодисперсних середовищах // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2016. № 42(1214). С. 54–63. DOI : <http://dx.doi.org/10.20998/2413-4295.2016.42.09>

20. Улучшение эксплуатационных свойств сплава на основе железа с эффектом памяти формы методом вакуумной переплавки / С. М. Нури, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Глотка, Н. В. Чечель // Процеси лиття. 2016. № 5(119). С. 68–72.

21. Нури С. М., Акимов О. В., Костик Е. А. Особенности эксплуатационных свойств сплава на основе железа с эффектом памяти формы // Металл и литье Украины. 2017. № 2–3(285–286). С. 27–29.

22. Mohammed A., Akimov O., Kostyk K. Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2017. № 3/12(87). С. 30–37. DOI : 10.15587/1729-4061.2017.103523 (**Scopus**)

23. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. Surface hardening of steel parts // Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. Праць / Одес. политехн. ун-т. Одесса, 2017. № 1(51). С. 17–23. DOI : 10.15276/opu.1.51.2017

24. Idan A., Akimov O., Kostyk K. Development of a combined technology for hardening the surface layer of steel 38Cr2MoAl // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2017. № 2/11(86). Р. 56–62. DOI : <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.100014> (Scopus)

25. Упрочнение стали 40Х комбинированной обработкой с применением лазера / А. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук // Металл и литье Украины. 2016. № 7(278). С. 33–35.

26. Kostyk K. Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment // EUREKA : Physics and Engineering. 2016. № 6. С. 46–52. DOI : <http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00220>

27. Патент № 111066 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA, Спосіб комбінованої обробки сталевих виробів / Ідан А., Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ» № u 2016 05447 ; заявл. 19.05.16 ; опубл. 25.10.16, Бюл. № 20. 5 с.

28. Патент № 116116 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA, Спосіб отримання твердого покриття на поверхні сталевих виробів / Ідан А., Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ» № u 2016 11442 ; заявл. 11.11.16 ; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. 6 с.

29. Патент № 116117 Україна, МПК8 С22С 38/00, С21D 7/13 UA, Сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми / Ахмед С. М., Акімов О. В., Костик К. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ» № u 2016 11448 ; заявл. 11.11.16 ; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. 5 с.

30. Патент № 117757 Україна, МПК8 С22С 38/04 UA, Дисперсійно-твердіючий сплав на основі заліза з ефектом пам'яті форми / Ахмед С. М., Акімов О. В., Костик К. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ» № u 2017 00053 ; заявл. 19.01.17 ; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. 6 с.

31. Патент № 116177 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA, Спосіб дифузійного борування сталевих виробів / Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХП» № у 2016 11988 ; заявл. 25.11.16 ; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. 6 с.

32. Патент № 116178 Україна, МПК8 С23С 8/00, С25D 5/50 UA, Спосіб поверхневого зміцнення сталевих виробів / Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХП» № у 2016 11989 ; заявл. 25.11.16 ; опубл. 10.05.17, Бюл. № 9. 6 с.

33. Патент № 117775 Україна, МПК8 С23С 8/68-70 UA, Склад для борування сталевих виробів / Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О.; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХП» № у 2017 00134 ; заявл. 03.01.17 ; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. 6 с.

34. Патент № 117770 Україна, МПК8 С23С 8/02-26 UA, Спосіб поверхневого зміцнення титанових сплавів / Акімов О. В., Костик К. О., Костик В. О. ; заявник та патентовласник Нац. техн. ун-т «ХП» № у 2017 00086 ; заявл. 03.01.17 ; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. 6 с.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35. Костик В. О., Літус К. О.*, Шульга О. В. Покращення властивостей титанових сплавів за допомогою нанодисперсних порошкових паст // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XVIII наук.-практ. конф., м. Харків, 12–14 трав. 2010 р. Харків, 2010. С. 25.

36. Літус К. О.*, Костик В. О. Борування сталей У8 та У12 в нанодисперсних порошках для підвищення стійкості пресформ лиття під тиском // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XIX наук.-практ. конф., м. Харків, 01–03 черв. 2011 р. Харків, 2011. С. 29.

37. Литус Е. А.*, Костик В. О. Влияние упрочнения азотированием стали 3Х3М3Ф на изменение износостойкости пресс-форм литья под

давлением медных сплавов // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., г. Краматорск, 12–16 сент. 2011 г. Краматорск, 2011. С. 122–124.

38. Літус К. О.*, Костик В. О., Хмелівська Ю. О. Вплив нітроцементациї на корозійну стійкість сталей // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XX наук.-практ. конф., м. Харків, 15–17 трав. 2012 р. Харків, 2012. С. 31.

39. Костик В. О., Костик К. О. Аналіз дифузійних процесів насичення сталевих виробів при боруванні з нанодисперсної пасту // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXI наук.-практ. конф., м. Харків, 29–31 трав. 2013 р. Харків, 2013. С. 29.

40. Костик К. О., Костик В. О. Моделювання глибини боридного шару при насиченні з нанопасту // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXII наук.-практ. конф., м. Харків, 15–17 жовт. 2014 р. Харків, 2014. С. 23.

41. Костик К. О., Костик В. О., Нікіфорова С. В. Зміцнення поверхневих шарів сталей методами ХТО в порошкових макро- та нанодисперсних середовищах // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXIII наук.-практ. конф., м. Харків, 20–22 трав. 2015 р. Харків, 2015. С. 327.

42. Костик К. О. Інноваційна нітроцементация легованої сталі // Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах : матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф., м. Запоріжжя, 06–09 жовт. 2015 р. Запоріжжя, 2015. С. 50.

43. Костик К. О., Костик В. О. Перспективні методи поверхневого зміцнення // Литво : матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Запоріжжя, 26–28 трав. 2015 р. Запоріжжя, 2015. С. 143–144.

44. Кхалаф М., Костик В. О., Костик Е. А. Математическая модель поверхностной твердости стали в зависимости от изменений технологических параметров ионного азотирования // Інформаційні технології : наука, техніка,

технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXIV наук.-практ. конф., м. Харків, 18–20 трав. 2016 р. Харків, 2016. С. 356.

45. Костик Е. А., Костик В. О., Аль-Рекаби Дафер Моделирование процесса газового азотирования // Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 30–31 трав. 2016 р. Київ, 2016. С. 80.

46. Костик К. О., Костик В. О. Азотування легованої сталі у плазмі тліючого розряду // Литво-2016 : матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Запоріжжя, 24–26 трав. 2016 р. Запоріжжя, 2016. С. 131–132.

47. Идан Алаа Фадил И., Акимов О. В., Костик Е. А. Особенности формирования упрочненного слоя при комбинированном азотировании стали // Синергетика, мехатроніка, телематика дорожніх машин і систем у навчальному процесі та науці : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 16 берез. 2017 р. Харків, 2017. С. 113–114.

48. Идан Алаа Фадил И., Акимов О. В., Костик Е. А. Особенности комбинированного упрочнения поверхностного слоя стальных деталей // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тез. доп. XXV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 17–19 трав. 2017 р. Харків, 2017. С. 4.

49. Идан Алаа Фадил И., Акимов О. В., Костик Е. А. Комбинированная технология упрочнения поверхности легированной стали // Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2017 : матеріали IX Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 30–31 трав. 2017 р. Київ, 2017. С. 77.

50. Идан Алаа Фадил И., Акимов О. В., Костик Е. А. Получение твердого покрытия на поверхности стальных изделий // Литво-2017 : матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 23–25 трав. 2017 р. Запоріжжя, 2017. С. 109.

* К. О. Костик – дівооче прізвище К. О. Літус

ABSTRACT

Kostyk K. O. Scientific basis of surface hardening technologies of machine parts by controlled composition powder mixtures. – On the rights of the manuscript.

The thesis for the scientific degree of doctor of technical sciences, specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering (13 – mechanical engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2019.

In the thesis a set of studies was aimed at solving an important scientific and technical problem in the field of engineering technology: the development of innovative and short-term technologies of machine parts surface hardening with controlled composition powder mixtures to ensure the performance properties of products at a high level with a significant reduction in the cost of their production.

The scientific novelty of the results lies in the development of scientific foundations of innovative and short-term technologies of surface hardening of machine parts by powder mixtures of controlled composition, which allowed to solve the actual scientific and practical problem of increasing the service life of machine parts and tools:

- for the first time, local maxima of surface hardness and depth of diffusion layers of alloys were calculated and theoretical optimal conditions of diffusion hardening processes were established, which allows obtaining specific technological parameters of the chemical and heat treatment (CHT) process and providing optimal characteristics of diffusion layers;

- for the first time created mathematical models and nomograms of existing technologies of surface hardening of steels, which allowed to determine the specific conditions of the CHT process (temperature and duration), based on a given depth of the diffusion layer or surface hardness of steels, which significantly affects the effectiveness of the implementation of strengthening processes;

- for the first time through the use of innovative technologies and systems analysis at minimal cost, developed a general methodological approach for control of technological processes of surface hardening of parts by the powder mixtures of

controlled composition at saturation of surface layers with nitrogen, carbon and boron, it is possible to improve the performance properties of products with a significant reduction in the CHT duration;

– further development of the developed CHT complex, which significantly reduces the fragility of boriding layers due to a more gradual decrease in hardness from the surface to the core products of steels, thus improving the operational properties of the goods and service life of machine parts and tools in contrast to known methods of the CHT, which only increase surface hardness;

- for the first time, a mathematical model of temperature distribution over the depth of the diffusion layer was developed, which made it possible to determine the nature of the dependences and obtain data on the temperature distribution over the depth of the product at different processing modes;

– improved boriding technology with pastes of titanium alloys through the use of nanodispersed saturating environment, thereby reducing the boriding process to 2-3 times and to shorten the manufacturing process of components by combining two operations: boriding and hardening a titanium alloy;

- solutions of boundary-value problems of diffusion by the boundary element method are proposed, which allowed for the first time to create a mathematical model of the distribution of boron concentration over the thickness of the hardened layer of a titanium alloy;

- the technology of intensification of processes by CHT of heating by high-frequency currents and by means of preliminary laser processing of details was improved, which allowed to obtain high performance properties of surface layers with a significant reduction in the duration of treatments.

The practical value of the work is to develop a technology of combined hardening of the surface layers of alloys making parts.

The following practical results are obtained on the basis of a set of theoretical and experimental studies, formulated principles, regularities and the following practical results are obtained:

1. Method of combined processing of steel products, including advanced laser processing of material surface with the laser radiation power of -1.0 ± 0.1 kW, the speed of movement of the laser beam of 0.5–1.5 m/min with subsequent nitriding. In addition, the nitriding is carried out in an environment of melamine with 3 to 5 % of sodium fluoride at a temperature of 530-560 °C for 2–3 hours (the patent of Ukraine No. 111066).

2. Method diffusion boriding steel products, including pre-application to the surface of the coating, which includes boriding substance, the activator sodium fluoride and a binder solution of glue BF in acetone, and heating by high frequency currents. In the coating as boriding substance use polyboride magnesium or amorphous boron, and optionally an activator is introduced lithium fluoride (the patent of Ukraine No. 116177).

3. Method of surface hardening steel parts comprising coating the surface of the part coating, which' is included boriding substance and activator, drying and heating by high frequency currents. In the coating as boriding substance use amorphous boron activator and lithium fluoride. The heating is carried out at a temperature of 800-1100 °C for 1-5 minutes (the patent of Ukraine No. 116178).

4. A method of producing a solid coating on the surface of steel products, including pre-processing the surface of the material and boriding. Carry out a preliminary laser treatment of the surface of the material with subsequent boriding in the environment polyboride magnesium, activators: sodium fluoride and lithium fluoride (the patent of Ukraine No. 116116).

5. The iron-based alloy with shape memory effect, contains: iron, manganese, silicon, carbon, chromium, nickel, cobalt, copper, vanadium, niobium, molybdenum. In this case, the alloy additionally introduced sulfur and phosphorus (weights. %): the manganese from 4 to 20; silicon 1.0 to 4.5; carbon 0.1 to 1.0; chromium, 10.0 to 25.0; nickel 1.0-10.0; cobalt 1.0-10.0; copper 1.0-4.0; vanadium 0.5 to 2.0; niobium from 0.3 to 1.5; molybdenum from 0.5 to 2.0; sulfur up to 0.01; phosphorus up to 0,045; iron-rest (the patent of Ukraine No. 116117).

6. Composition for boriding steel products containing amorphous boron, tetrafluoroborate potassium, boron nitride and dolomite (the patent of Ukraine No. 117775).

7. Method of surface hardening of titanium alloys, including a saturation of the surface layers of components boron environment, which includes boriding substance and the activator, and heating. The saturation of the surface layers is performed by components boron environment that consists of amorphous boron and lithium fluoride (the patent of Ukraine No. 117770).

8. The dispersion hardening iron-based alloy with shape memory effect, contains: iron, manganese, silicon, carbon, vanadium, niobium, tungsten. Included aluminum, copper, nickel, chromium, sulfur and phosphorus (the patent of Ukraine No. 117757).

9. Developed technological processes were introduced to improve the surface hardness of steel products at the limited liability company "ASTIL M" (Kharkiv), improving the durability of the sleeve by 1.5 times after nitrocarburizing, 4.3-fold after successive nitrocarburizing and boriding, 5 times after carburizing, nitrocarburizing and boriding and 2 times after boriding with microwave heating compared to a sleeve without surface hardening (the implementation Act from 05.10.2017).

10. Developed technological processes of the combined consolidation was implemented to improve surface hardness of steel products at Public company «Kharkiv machine-building plant "SVET SHAKHTYORA" (Kharkiv). Production tests have proved that the proposed effective technological processes of the combined hardening of surface layers of steel products will significantly accelerate the technological processes of chemical heat treatment in 2-10 times, led to reduced costs for them by saving electrical energy (the implementation Act from 17.10.2017).

11. Developed technological processes have been introduced at the limited liability company "Scientific-production Centre of the European mechanical engineering technology" (Kharkiv), thus improving the durability of the sleeve by

1.5 times after nitrocarburizing, 4.3-fold after successive nitrocarburizing and boriding (the implementation Act from 31.10.2017).

12. Adopted for implementation in production of developed nomograms that allow to define specific conditions of gas nitriding (temperature and duration) based on the desired depth of nitrified layer or the surface hardness of products of steel 38Cr2MoAl at Public company "Kharkiv machine-building plant «SVET SHAKHTYORA" (Kharkiv). Determined that the proposed nomograms greatly simplified the work of the engineer and these nomograms allowed to solve the inverse problem, to estimate the possible thickness of the hardened layer and surface hardness, at the same time of temperature and duration of gas nitriding (the implementation Act from 15.11.2017).

13. Developed an effective technological process of nitrocarburizing in microdisperse powder mixture to improve the operational stability of the toothed wheel of steel 38Cr2MoAl at private joint stock company "Kharkiv Tractor Plant". The use of microdisperse mixture accelerated the process of chemical-heat treatment by 1,5-2 times while getting the properties of the surface layer of the product such as after the nitrocarburizing, which reduced the costs of conducting chemical-thermal treatment by 2 times (the implementation Act from 24.01.2018).

14. The developments made in the thesis introduced in the educational process for students of mechanical engineering faculty of NTU "KhPI" special 131 "Applied mechanics" specialization 131-09 "Equipment and technology of foundry" and 151 "Automation and computer integrated technologies" specialization 151-07 "Computerized control of technological processes" (the implementation Act from 20.12.2017).

Keywords: diffusion saturation processes, mathematical modeling, firming complex processing of materials, operating properties, surface hardness, diffusion layer, wear resistance

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT ON THE TOPIC OF THE THESIS

List of publications in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Kostyk K. O. Pidvyshchennia znosostiikosti detalei pres-form lyttia pid tyskom metodom boruvannia z nanopast // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2013. № 70(1043). P. 8–12.
2. Kostyk K. O. Zmitsnennia pres-form lyttia pid tyskom po nanotekhnolohii // Problemy mashynobuduvannia. 2013. № 5. P. 113–118.
3. Kostyk K. O. Pidvyshchennia dovhovichnosti detalei enerhetychnoho mashynobuduvannia metodom nitrotsementatsii v makrodypersnii sumishi // Mashynobuduvannia : zb. nauk. pr. / Ukr. inzh.-ped. akademiia MONMS Ukrainy. Kharkiv, 2013. № 12. P. 50–55.
4. Kostyk V. O., Kostyk K. O., Dolzhenko A. S. Poverkhneve zmitsnennia detalei avtomashyn ta traktoriv metodom nyzkotemperaturnoi nitrotsementatsii v poroshkovomu seredovyschi // Avtomobilnyi transport : zb. nauk. pr. / Khark. nats. avt.-dorozhn. un-t. Kharkiv, 2013. V. 33. P. 115–119.
5. Kostyk K. O. Innovatsiinyi metod pidvyshchennia dovhovichnosti detalei mashyn khimiko-termichnoiu obrobkoiu // Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva. 2014. № 1/3(15). P. 20–21.
6. Kostyk V. O., Kostyk K. O. Vyvchennia zminy koefitsiientu dyfuzii vuhletsiu zalezho vid temperatury khimiko-termichnoi obrobky stali 20Kh // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2014. № 38(1011). P. 21–29.
7. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Modeliuvannia hlybyny borydnoho sharu stali 4Kh5MFS pry zmini tryvalosti boruvannia po nanotekhnolohii // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2014. № 40(1083). P. 145–149.

8. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Porivnialnyi analiz vplyvu hazovoho ta ionno-plazmovoho azotuvannia na zminu struktury i vlastyvostei lehovanoi stali 30Kh3VA // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2014. № 48(1090). P. 21–41.

9. Ponomarenko O. Y., Kostyk E. A., Fedorov H. E. Yzghotovlenye otlivok s dyfferentsyrovannimy svoistvamy poverkhnosty // Kompresorne i enerhetychne mashynobuduvannia. 2015. № 4(42). P. 40–44.

10. Shvydkisnyi metod nitrotsementatsii lehovanoi stali / K. O. Kostyk, V. O. Kostyk, A. S. Dolzhenko, S. V. Nikiforova // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2015. № 14(1123). P. 35–41.

11. Kostyk K. O. Zmitsnennia poverkhni instrumentu zi stali 38Kh2MIuA kompleksnoi khimiko-termichnoi obrobkoi stali // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI» : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2015. № 39(1148). P. 26–33.

12. Kostyk K. O. Research of influence of gas nitriding duration on formation of diffusion layer of steel 20Kh2N4A // Pratsi Odeskoho politekhnichnogo universytetu : zb. nauk. prats / Odes. polytekhn. un-t. Odessa, 2015. Vyp. 2(46). P. 14–18. DOI : 10.15276/opu.2.46.2015.04

13. Kostyk K. O. Rozrobka shvydkisnoi tekhnolohii boruvannia lehovanoi stali // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2015. № 6/11(78). P. 8–15. DOI : 10.15587/1729-4061.2015.55015 (**Scopus**)

14. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Nanodispersed boriding of titanium alloy // Pratsi Odeskoho politekhnichnogo universytetu : zb. nauk. Prats / Odes. polytekhn. un-t. Odessa, 2015. Vyp. 3(47). P. 17–23. DOI : 10.15276/opu.3.47.2015.04

15. Kostyk K. O. Rozrobka tekhnolohii mistsevoho poverkhnevoho zmitsnennia zubchatoho tsylindrychnoho koleasa vidtsentrovanooho zmishuvacha // Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni. 2015. № 2. P. 39–43.

16. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal передовykh tekhnolohii*. 2016. № 2/5(80). P. 45–49. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.65454 (**Scopus**)

17. The choice of the optimal temperature and time parameters of gas nitriding of steel / W. Dhafer, V. Kostyk, K. Kostyk, A. Glotka, M. Chechel // *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal передовykh tekhnolohii*. 2016. № 3/5(81). P. 44–50. DOI : 10.15587/1729-4061.2016.69809 (**Scopus**)

18. Vlyanye predvartelnoi termycheskoi obrabotky y rezhymov lazernoi zakalky na strukturoformyrovanye staly / A. Ydan, O. V. Akymov, E. A. Kostyk, A. A. Honcharuk // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2016. № 18(1190). P. 66–73. DOI : 10.20998/2413-4295.2016.18.10

19. Kostyk K. O. Poverkhneve dvosharove zmitsnennia stali pry poslidovnomu nasychenni vuhletsem ta borom v poroshkovykh makro-ta nanodispersnykh seredovyschakh // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2016. № 42(1214). P. 54–63. DOI : <http://dx.doi.org/10.20998/2413-4295.2016.42.09>

20. Uluchshenye ekspluatatsyonnikh svoistv splava na osnove zheleza s efektom pamiaty formy metodom vakuumnoi pereplavky / S. M. Nuri, O. V. Akimov, E. A. Kostyk, A. A. Hlotka, N. V. Chechel // *Protsesy lyttia*. 2016. № 5(119). P. 68–72.

21. Nuri S. M., Akimov O. V., Kostyk E. A. Osobennosty ekspluatatsyonnikh svoistv splava na osnove zheleza s efektom pamiaty formi // *Metall y lyte Ukraini*. 2017. № 2–3(285–286). P. 27–29.

22. Mohammed A., Akimov O., Kostyk K. Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery // *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal передовykh tekhnolohii*. 2017. № 3/12(87). P. 30–37. DOI : 10.15587/1729-4061.2017.103523 (**Scopus**)

23. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. Surface hardening of steel parts // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu : zb. nauk. Prats / Odes. polytekh. un-t. Odessa, 2017. № 1(51). P. 17–23. DOI : 10.15276/opu.1.51.2017

24. Idan A., Akimov O., Kostyk K. Development of a combined technology for hardening the surface layer of steel 38Cr2MoAl // Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2017. № 2/11(86). P. 56–62. DOI : <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.100014> (Scopus)

25. Uprochnenye staly 40Kh kombynyrovannoi obrabotkoi s pryomenenyem lazera / A. Ydan, O. V. Akymov, E. A. Kostyk, A. A. Honcharuk // Metall y lyte Ukrainy. 2016. № 7(278). P. 33–35.

26. Kostyk K. Development of innovative method of steel surface hardening by a combined chemical-thermal treatment // EUREKA : Physics and Engineering. 2016. № 6. P. 46–52. DOI : <http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00220>

27. Patent № 111066 Ukraina, MPK8 S23S 8/02-26 UA, Sposib kombinovanoi obrobky stalevykh vyrobiv / Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2016 05447 ; zaiavl. 19.05.16 ; opubl. 25.10.16, Biul. № 20. 5 p.

28. Patent № 116116 Ukraina, MPK8 S23S 8/02-26 UA, Sposib otrymannia tverdoho pokryttia na poverkhni stalevykh vyrobiv / Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2016 11442 ; zaiavl. 11.11.16 ; opubl. 10.05.17, Biul. № 9. 6 p.

29. Patent № 116117 Ukraina, MPK8 S22S 38/00, C21D 7/13 UA, Splav na osnovi zaliza z efektom pamiaty formy / Akhmed S. M., Akimov O. V., Kostyk K. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2016 11448 ; zaiavl. 11.11.16 ; opubl. 10.05.17, Biul. № 9. 5 p.

30. Patent № 117757 Ukraina, MPK8 C22C 38/04 UA, Dyspersiino-tverdiuchy splav na osnovi zaliza z efektom pamiaty formy / Akhmed S. M., Akimov O. V., Kostyk K. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2017 00053 ; zaiavl. 19.01.17 ; opubl. 10.07.17, Biul. № 13. 6 p.

31. Patent № 116177 Ukraina, MPK8 S23S 8/02-26 UA, Sposib dyfuziinoho boruvannia stalevykh vyrobiv / Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2016 11988 ; zaiavl. 25.11.16 ; opubl. 10.05.17, Biul. № 9. 6 p.

32. Patent № 116178 Ukraina, MPK8 S23S 8/00, S25D 5/50 UA, Sposib poverkhnevoho zmitsnennia stalevykh vyrobiv / Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2016 11989 ; zaiavl. 25.11.16 ; opubl. 10.05.17, Biul. № 9. 6 p.

33. Patent № 117775 Ukraina, MPK8 S23S 8/68-70 UA, Sklad dlia boruvannia stalevykh vyrobiv / Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2017 00134 ; zaiavl. 03.01.17 ; opubl. 10.07.17, Biul. № 13. 6 p.

34. Patent № 117770 Ukraina, MPK8 S23S 8/02-26 UA, Sposib poverkhnevoho zmitsnennia tytanovykh splaviv / Akimov O. V., Kostyk K. O., Kostyk V. O. ; zaiavnyk ta patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t «KhPI» № u 2017 00086 ; zaiavl. 03.01.17 ; opubl. 10.07.17, Biul. № 13. 6 p.

List of publications certifying the approbation of the thesis materials:

35. Kostyk V. O., Litus K. O.*, Shulha O. V. Pokrashchennia vlastyvoستي tytanovykh splaviv za dopomohoiu nanodispersnykh poroshkovykh past // Informatsiini tekhnolohii : nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhVIII nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 12–14 trav. 2010 r. Kharkiv, 2010. P. 25.

36. Litus K. O.*, Kostyk V. O. Boruvannia stalei U8 ta U12 v nanodispersnykh poroshkakh dlia pidvyshchennia stiikosti presform lyttia pid tyskom // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhIKh nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 01–03 cherv. 2011 r. Kharkiv, 2011. P. 29.

37. Litus E. A.*, Kostyk V. O. Vlyianye uprochneniya azotyrovanyem staly 3Kh3M3F na yzmenenye yznosostoikosty press-form lytia pod davlenyem mednikh

splavov // Perspektivnie tekhnolohyy, materyali y oborudovanye v lyteinom proyzvodstve : materyali III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., h. Kramatorsk, 12–16 sent. 2011 h. Kramatorsk, 2011. P. 122–124.

38. Litus K. O.*, Kostyk V. O., Khmelivska Yu. O. Vplyv nitrotsementatsii na koroziinu stiikist stalei // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhKh nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 15–17 trav. 2012 r. Kharkiv, 2012. P. 31.

39. Kostyk V. O., Kostyk K. O. Analiz dyfuziinykh protsesiv nasychennia stalevykh vyrobiv pry boruvanni z nanodispersnoi pasty // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhKhI nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 29–31 trav. 2013 r. Kharkiv, 2013. P. 29.

40. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Modeliuvannia hlybyny borydnoho sharu pry nasychenni z nanopasty // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhKhII nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 15–17 zhovt. 2014 r. Kharkiv, 2014. P. 23.

41. Kostyk K. O., Kostyk V. O., Nikiforova S. V. Zmitsnennia poverkhnevyykh shariv stalei metodamy KhTO v poroshkovykh makro- ta nanodispersnykh seredovyshchakh // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhKhIII nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 20–22 trav. 2015 r. Kharkiv, 2015. P. 327.

42. Kostyk K. O. Innovatsiina nitrotsementatsiia lehovanoi stali // Nemetalevi vkraplennia i hazy u lyvarnykh splavakh : materialy KhIV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Zaporizhzhia, 06–09 zhovt. 2015 r. Zaporizhzhia, 2015. P. 50.

43. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Perspektivni metody poverkhnevoho zmitsnennia // Lytvo : materialy XI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Zaporizhzhia, 26–28 trav. 2015 r. Zaporizhzhia, 2015. P. 143–144.

44. Kkhalaf M., Kostyk V. O., Kostyk E. A. Matematycheskaia model poverkhnostnoi tverdosty staly v zavysymosty ot yzmenenyi tekhnolohycheskykh parametrov yonnoho azotyrovanyia // Informatsiini tekhnolohii : nauka, tekhnika,

tehnolohiia, osvita, zdorovia : materialy KhKhIV nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 18–20 trav. 2016 r. Kharkiv, 2016. P. 356.

45. Kostyk E. A., Kostyk V. O., Al-Rekaby Dafer Modelyrovanye protsessa hazovoho azotyrovanyia // Novi materialy i tekhnohii v mashynobuduvanni : materialy VIII Mizhnar. nauk.-tekh. konf., m. Kyiv, 30–31 trav. 2016 r. Kyiv, 2016. P. 80.

46. Kostyk K. O., Kostyk V. O. Azotuvannia lehovanoi stali u plazmi tliiuchoho rozriadu // Lytvo-2016 : materialy XII Mizhnar. nauk.-tekh. konf., m. Zaporizhzhia, 24–26 trav. 2016 r. Zaporizhzhia, 2016. P. 131–132.

47. Idan Alaa Fadil I., Akimov O. V., Kostyk E. A. Osobennosty formyrovanyia uprochnennoho sloia pry kombynyrovannom azotyrovanny staly // Synerhetyka, mekhatronika, telematyka dorozhnykh mashyn i system u navchalnomu protsesi ta nautsi : materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 16 berez. 2017 r. Kharkiv, 2017. P. 113–114.

48. Idan Alaa Fadil I., Akimov O. V., Kostyk E. A. Osobennosty kombynyrovannoho uprochnenyia poverkhnostnoho sloia stalnykh detalei // Informatsiini tekhnohii: nauka, tekhnika, tekhnohii, osvita, zdorovia : tez. dop. KhXV Mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Kharkiv, 17–19 trav. 2017 r. Kharkiv, 2017. P. 4.

49. Idan Alaa Fadil I., Akimov O. V., Kostyk E. A. Kombynyrovannaia tekhnohiiya uprochnenyia poverkhnosty lehyrovanoi staly // Novi materialy i tekhnohii v mashynobuduvanni-2017 : materialy IX Mizhnar. nauk.-tekh. konf., m. Kyiv, 30–31 trav. 2017 r. Kyiv, 2017. P. 77.

50. Idan Alaa Fadil I., Akimov O. V., Kostyk E. A. Poluchenye tverdoho pokrytyia na poverkhnosty stalnykh yzdelyi // Litvo-2017 : materialy XIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Zaporizhzhia, 23–25 trav. 2017 r. Zaporizhzhia, 2017. P. 109.

* K. O. Kostyk – divoche prizvyshche K. O. Litus

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЗАВДЯКИ ФІЗИКО- ТЕХНІЧНІЙ ОБРОБЦІ.....	19
1.1 Загальні закономірності процесів хіміко-термічної обробки.....	19
1.1.1 Дисоціація.....	20
1.1.2 Адсорбція на поверхні металу насичувального елемента.....	22
1.1.3 Процеси дифузії в металі.....	22
1.2 Процес насичення поверхневих шарів сплавів атомарним азотом.....	26
1.2.1 Газове азотування.....	26
1.2.2 Плазмове азотування.....	27
1.2.3 Азотування у соляних ваннах.....	27
1.2.4 Азотування виробів у порошкових сумішах.....	28
1.3 Зміцнення виробів боруванням.....	28
1.4 Цементация.....	43
1.5 Сутність процесу нітроцементации.....	51
1.6 Хіміко-термічна обробка титанових сплавів.....	56
1.7 Методи комбінованої обробки.....	59
1.8 Сплави на основі заліза з дисперсійним твердінням.....	70
1.9 Висновки за розділом 1 та постановка завдань дослідження.....	72
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ.....	74
2.1 Технологічний процес борування сталі.....	74
2.2 Технологічний процес газового азотування сталі.....	83
2.3 Технологічний процес іонно-плазмового азотування сталі.....	93

2.4 Моделювання дифузійних процесів при хіміко-термічній обробці виробів.....	100
2.5. Висновки за розділом 2.....	109
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ НАСИЧЕННЯ СТАЛІ АТОМАРНИМ БОРОМ, ВУГЛЕЦЕМ ТА АЗОТОМ.....	111
3.1 Теоретичні основи технологічного процесу насичення сталі атомарним бором.....	111
3.1.1 Склад середовища для процесу насичення сталей атомарним бором.....	111
3.1.2 Процеси будови борованого шару, перехідної зони і мікроструктури сталей після борування при пічному нагріванні.....	115
3.1.3 Вплив температури борування на товщину і твердість борованого шару.....	128
3.1.4 Коефіцієнт дифузії бору при пічному нагріванні сталі 38Х2МЮА.....	131
3.2 Технологічні процеси насичення сталі атомарним вуглецем.....	134
3.2.1 Формування цементованого шару.....	134
3.2.2 Властивості цементованого шару.....	144
3.2.3 Коефіцієнт дифузії вуглецю при пічному нагріванні.....	148
3.3 Технологічні процеси насичення сталі атомарним вуглецем та азотом.....	151
3.3.1 Вплив температури на формування дифузійного шару сталі....	151
3.3.2 Вплив тривалості часу на формування дифузійного шару.....	172
3.3.3 Формування дифузійних шарів при низькотемпературній нітроцементациї легованої сталі у новому насичувальному середовищі.....	172
3.4 Технологічні процеси послідовного насичення сталі атомарними елементами – вуглецем і азотом (комплексна ХТО) та фізико-механічні характеристики шарів.....	176

3.4.1 Формування дифузійного шару завдяки комплексному послідовному процесу насичення атомарним вуглецем і азотом.....	176
3.4.2 Властивості зміцненого дифузійного шару.....	185
3.4.3 Коефіцієнт дифузії азоту після комплексної ХТО.....	193
3.5 Висновки за розділом 3.....	196
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ КОМПЛЕКСНОГО НАСИЧЕННЯ СТАЛІ АТОМАРНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ДИФУЗІЙНОГО ШАРУ.....	200
4.1 Технологічні процеси послідовного насичення сталі атомарними елементами – вуглецем і бором (комплексна ХТО) для зменшення крихкості борованого шару.....	200
4.1.1 Формування дифузійних шарів сталі при комплексному насиченні вуглецем та бором.....	200
4.1.2 Вплив температури комплексної хіміко-термічної обробки на глибину дифузійного шару сталі	206
4.1.3 Коефіцієнт дифузії бору після попередньої цементації.....	208
4.2 Фізичні основи процесів послідовного насичення сталі атомарними елементами – азотом з вуглецем і бором (комплексна ХТО – нітроцементация та борування) для формування композиційної структури дифузійного шару.....	211
4.2.1 Особливості будови борованого шару, перехідної зони і мікроструктури сталі після комплексної ХТО.....	211
4.2.2 Вплив температури борування на товщину і твердість борованого шару після нітроцементация.....	220
4.2.3 Коефіцієнт дифузії бору при комплексній ХТО легованої сталі..	222
4.3 Основи процесів послідовного насичення сталі атомарними елементами при комплексній ХТО (цементация, нітроцементация та борування).....	224

4.3.1 Формування дифузійного шару сталі при комплексній ХТО.....	224
4.3.2 Вплив температури комплексної хіміко-термічної обробки на глибину дифузійного шару сталі.....	228
4.4 Фізичні основи дифузійних процесів, які відбуваються при насиченні атомарними елементами за розробленими технологіями.....	232
4.5 Розподіл температури по глибині дифузійних n-шарів при комплексній хіміко-термічній обробки.....	236
4.6 Висновки за розділом 4.....	256
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БОРУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ.....	259
5.1 Вплив нанотехнології на формування структури борованого шару титанового сплаву.....	259
5.2 Дослідження впливу часу витримки боровання на зміну мікротвердості і товщини дифузійного шару.....	289
5.3 Результати фазового аналізу.....	291
5.4 Коефіцієнт дифузії бору при пічному нагріві.....	296
5.5 Моделювання глибини борованого шару титанового сплаву при пічному нагріві у нанодисперсній суміші.....	306
5.6 Висновки за розділом 5.....	310
РОЗДІЛ 6 СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗМІЦНЕННЯ.....	311
6.1 Інтенсифікація процесів ХТО методами струмами високої частоти та лазерною обробкою.....	311
6.2 Об'ємне зміцнення сталей в процесі дисперсійного твердіння.....	334
6.3 Вплив зміцнюючих обробок на зміну глибини шару, поверхневої твердості та зносостійкості поверхневого шару сталі 38Х2МЮА.....	340
6.4 Практична реалізація технологій в навчальний процес.....	350
6.5 Промислова реалізація технологічних основ на виробництві.....	351

6.6 Висновки за розділом 6.....	353
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	356
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	360
ДОДАТКИ.....	390
Додаток А.....	391
Додаток Б.....	398
Додаток В.....	399
Додаток Д.....	400
Додаток Ж.....	401
Додаток З.....	402
Додаток К.....	403