

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ХАРЧОВОГО І ЗЕРНОПЕРЕРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ

Соколов О.Д., д-р техн. наук, професор  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Представлено дослідження технологій поверхневого зміцнення і порівняльне дослідження зносостійкості зміцнених шарів для застосування на деталях харчового і переробного обладнання. Досліджено надтверді покриття з оксидів, карбідів і нітридів і зміцнення поверхні чавуну і сталі іонним азотуванням, електроіскровим і лазерним гартуванням.*

*Research of technologies of the superficial consolidating and comparative research of wearproofness of the consolidated layers is presented for application on the details of food and processing equipment. Hard coverages are probed from oxides, carbides and nitrides and consolidating of surface of cast-iron and steel ionic nitriding, electrospark and laser tempering.*

Ключові слова: зносостійкість, надтверді покриття, іонне азотування, лазерне опромінювання, електроіскрове легування.

**Вступ.** Інтенсифікація технологічних процесів харчових і зернопереробних виробництв часто спричиняє підвищення температури і тиску в апаратах, прискоренням руху потоків сировини і готової продукції. Ці фактори неминуче викликають зростання рівня зносу конструкційних і інструментальних матеріалів, що значно знижує експлуатаційну надійність і довговічність обладнання, металоконструкцій і трубопроводів. Яскравими прикладами високого рівня руйнування таких деталей у потоці продукту є розсікувач пневмосепаратора, молотки зернодробарок і пневмотранспортна труба у зернопереробному обладнанні, робочі органи тістоділильних машин, різальні комплекти м'ясорізальних вовчків і кутерів, клапани гомогенізаторів у молочному виробництві тощо. Тому дослідження по розробці технологій зміцнення матеріалів, що виконуються відповідно з держбюджетною науково-дослідною роботою ОНАХТ, є актуальними і становлять теоретичний і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій [1–4] показує, що пропонуються різні зносостійкі покриття і способи зміцнення, але не існує загального підходу до комплексного вирішення проблеми зношування робочих органів харчових і зернопереробних машин. Усі зернові і харчові продукти мають у своєму складі жири, білки, мінеральні солі й органічні кислоти і руйнування контактуючих з ними металевих деталей обладнання чиниться внаслідок механохімічного зношування, але переважна більшість матеріалів, що показують у дослідженнях підвищену зносостійкість, не допускаються до контакту з харчовими продуктами, що і зостається на сьогодні невирішеною частиною проблеми.

Відповідно до переліку матеріалів, контактуючих з харчовими продуктами, у хлібопекарному, виноробному, консервному, м'ясному і молочному обладнанні із металів допущені тільки алюміній, титан, чавун, сталь вуглецева і сталь хромонікелева, тому наші дослідження були зосереджені саме на цих матеріалах. Нашими попередніми багаторічними дослідженнями щодо застосування в машинобудівних деталях технологій формування надтвердих покриттів з карбідів, оксидів і нітридів [5–7] і технологій зміцнення поверхні деталей іонним азотуванням, електроіскровим і лазерним гартуванням [8–10] доведено принципову можливість застосування вказаних методів для умов механохімічного зношування.

Мета роботи – показ результатів проведених порівняльних досліджень вказаних технологій для подальшого їх застосування щодо деталей харчового і зернопереробного обладнання.

**Матеріали і методика.** Досліджували покриття з оксиду алюмінію, нанесені на установці УМП5-68 в азотній плазмі, покриття з нітриду титану, нанесені на установці "Булат" і покриття з карбіду хрому, утворені термообробкою хромових покриттів на високовуглецевій сталі. Зміцнення поверхневого шару чавуну і сталі проводили іонним азотуванням на вакуумній установці у плазмі тліючого розряду, лазерним опроміненням на безперервному CO<sub>2</sub>-лазері "Спектрофізик" і поверхневим гартуванням графітовим електродом на приладі електроіскрового легування "Дискрет".

Мікроструктуру досліджували на оптичному і електронному мікроскопах, мікротвердість – на приладі ПМТ-3, рентгеноструктурний аналіз проводили на приладах УРС-0,02 і ДРОН-3, мікрорентгеноспектральний – на приладі GXR-5 фірми "Джеол". Порівняльні дослідження зносостійкості проводили в умовах граничного тертя ковзання на машині тертя СМЦ-2 у парі з чавуном при швидкостях ковзання 1,3...4,16 м/с, шляху тертя 51 км і навантаженні 1,75 МПа. Контролювали масовий та лінійний зноси зразка і контртіла.

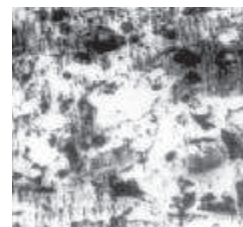
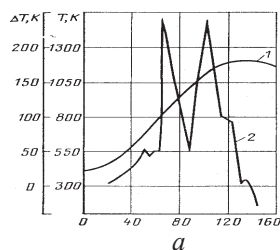
### Технології формування надтвердих покриттів з оксидів, карбідів і нітридів для сталевих м'ясорізальних ножів вовчків і клапанів гомогенізаторів

**Умови роботи.** Практична робота вовчків на м'ясокомбінаті показує, що знос ножів з високовуглецевої сталі У10А при ковзанні по сітці зі сталі У8А за 4...6 годин машинного часу (двозмінна робота) складає на обидва боки зубців 0,3...0,4 мм, а знос сітки – біля 0,1 мм. Геометрично це відповідає закругленню ріжучої кромки до радіуса 20 мкм. Досягнувши таких розмірів, ножі починають недопустимо змінати м'ясо, тому їх переточують кожен день. Зрозуміло, що ресурс роботи треба задати не менш як вдвічі більшим і для забезпечення ефекту самозаточування необхідно заздалегідь зміцнювати поверхню ножа надтвердими покриттями товщиною 20 мкм.

Процес гомогенізації проходить у щілині розміром менше 0,1 мм між грибок і сідлом клапану гомогенізатора, куди молоко нагнітається плунжерним насосом під тиском 35–45 МПа (350–450 атм., іноді до 600) і рухається зі швидкістю 150–250 м/с. Тиск після входу різко зменшується, інколи доходячи до розрідження у 0,6 атм., відриваючись від стінок потік стає вихровим, у рідині виникає кавітація. При надходженні рідини зношується гостра передня крайка сідла клапана і відповідна їй поверхня. Внаслідок кавітаційних явищ, у щілині на сідлі і клапані з'являються «віспини», а інша робоча поверхня набуває ризок, що відповідають радіальному прямуюванню рідини. Збільшення розмірів «віспин» і ризок призводить до значного зниження ефекту гомогенізації, тому необхідне відновлення сполучених поверхонь, часта заміна клапана. Застосування покриттів з надтвердих оксидів, нітридів і карбідів може значно знизити швидкість зношування відносно об'єму продукту в порівнянні з нержавіючою сталлю 20Х17Н2, (з неї вироблені серійні клапани гомогенізаторів).

**Отримання покриттів з оксиду алюмінію.** Гідності покриттів з оксиду алюмінію, з огляду на його високу твердість і нешкідливість для харчових продуктів, показують, що при збільшенні їх адгезійної і когезійної міцності, вони можуть в значній мірі протистояти зносу і бути застосовані в харчовому устаткуванні. Згідно з результатами роботи [6] дієвим засобом підвищення міцності плазмових покриттів є збільшення енергії їх формування за рахунок екзотермічних реакцій у порошку під час напилювання, що дозволяє довше підтримувати частки порошку у розплавленому стані. До класу речовин, що виявляють екзотермічний ефект, теоретично відноситься суміш оксиду алюмінію з алюмінієм.

У наших дослідженнях практична перевірка порошку  $Al_2O_3 + 30\% Al$ , отриманого капсулюванням алюмінієм часток порошку оксиду, була проведена методом диференціального термографічного аналізу на стандартному приладі при різних швидкостях нагрівання. Температура нагрітого порошку у порівнянні з температурою оксиду стає більшою, показуючи у часі по мірі нагрівання два максимума (833 і 1103 К), що пов'язано з окисленням оболонки алюмінію на частках у твердій і рідкій фазах до  $\alpha-Al_2O_3$ . Термограма приведена на рис. 1а, а мікроструктура отриманого з такого порошку покриття мікротвердістю 14,3 ГПа – на рис. 1б.



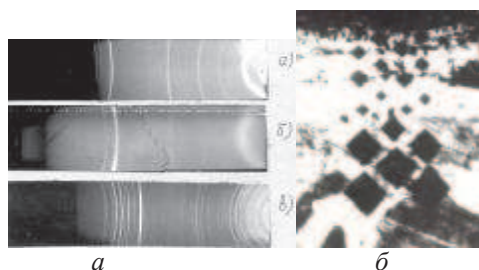
а – термограми порошків оксиду алюмінію для плазмового напилювання: 1 –  $Al_2O_3$ , 2 –  $Al_2O_3 + 30\% Al$ ;  
б – мікроструктура плазмового покриття  $Al_2O_3 + 30\% Al$ , подовжній шліф,  $1000\times$ .

#### Рис. 1 – Отримання покриттів з оксиду алюмінію

**Отримання покриттів з нітриду титану.** Отримане іонно-вакуумним осадженням покриття з нітриду титану завдяки надзвичайно високій мікротвердості в порівнянні з іншими покриттями, високій міцності зчеплення, малій товщині, щільній структурі і нешкідливості для харчових продуктів може стати дієвим засобом підвищення зносостійкості невеликих за розмірами деталей харчового обладнання [7]. У наших дослідженнях покриття з нітриду титану наносили на установці “Булат” при струмі току дуги 100 А, пришвидшувальній напрузі на зразку 120 В, тиску азоту 0,5 Па і температурі 500 °С. Покриття на чавунних і сталевих роликах для машини тертя мають золотавий колір, однофазний склад TiN, мікротвердість 20–22 ГПа і товщину 5–7 мкм із подальшим зміцненням матеріалу у глибину зразка.

**Отримання покриттів з карбиду хрому.** При проведенні досліджень хіміко-термічного процесу газової карбідизації хромових покриттів [5] було відмічено виникнення шару карбідів хрому на межі по-

криття з високовуглецевою сталлю. Розвиток цього напрямку останнім часом дозволив запропонувати процес високотемпературного дифузійного відпалу деталей харчового обладнання із попередньо нанесеним хромовим покриттям товщиною 20 мкм. Виявлено оптимальні режими обробки: відпал при температурі 1050 °С впродовж 6 годин і гартування від 850 °С у рідкому мастилі при кімнатній температурі. Металографічними і рентгенівськими дослідженнями (рис. 2) встановлено, що мікротвердість отриманого з різних хромових покриттів товщиною 20 мкм шару карбиду хрому складає 19...21 ГПа, переважний склад – Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, кислотостійкість на порядок вища, ніж у вихідних хромових покриттях.



а – структура шару карбідів хрому на сталі, 300<sup>X</sup>; б – рентгенограми вихідних вакуумного (а) і гальванічного (б) хромових покриттів і утвореного шару карбідів хрому (в)

Рис. 2 – Отримання покриттів з карбиду хрому

**Порівняльні дослідження зносостійкості.** Дослідження зносостійкості проводилися у порівнянні із гартованою сталлю У10, з якої виробляють ножі м'ясорізальних вовчків за схемою “ролик - колодка”. Покриття наносили на циліндричну поверхню ролика, котрий обертався у машині тертя із визначеною швидкістю. У якості контртіла застосовували чавунні колодки. Після припрацювання до стабілізації моменту тертя проводили дослідження при граничному режимі змащування. Кожний результат вимірів відповідає середній величині зносу не менш як трьох зразків для досягнення похибки не більше 10 %. Інтенсивність зношування представлена як відношення лінійного зносу до шляху тертя. Результати дослідження, приведені у табл. 1, показують, що досить вагоме (в середньому у три рази) збільшення твердості за рахунок нанесення надтвердих покриттів викликає значне підвищення зносостійкості.

Таблиця 1 – Механічне зношування надтвердих покриттів: знос по масі, мг / інтенсивність зношування, Ін.1010; машина тертя СМЦ-2, схема “ролик – колодка”, тиск 1,75 МПа, граничне змащування; контртіло тертя – колодка із сірого чавуну

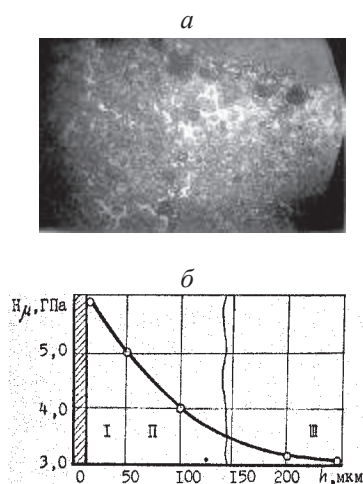
Матеріал і вид поверхневого зміцнення ролика	Твердість поверхні, Н <sub>ц</sub> , ГПа	Швидкість ковзання					
		1,3 м/с		2,13 м/с		4,16 м/с	
		Ролик	Колодка	Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
Гартована сталь У10	6,1	4,8/0,57	6,4/0,77	2,9/0,35	4,8/0,58	1,8/0,22	3,5/0,48
СЧ + ТО карбід хрому	19,5	0,5/0,06	1,7/0,20	1,3/0,16	2,0/0,24	2,6/0,31	2,5/0,30
СЧ + КІБ нітрид титану	20,0	0,4/0,05	1,8/0,22	1,2/0,15	2,1/0,25	2,5/0,30	2,6/0,31
СЧ + оксид алюмінію	14,3	0,5/0,06	2,4/2,92	0,7/0,08	5,0/0,60	0,8/0,10	7,9/0,95

**Технології поверхневого зміцнення чавуну і сталі іонним азотуванням, електроіскровим і лазерним гартуванням для розсікувачів пневмосепараторів і молотків зернодробарок**

**Умови роботи.** Розсікувач пневмосепаратора – важка сталева або чавунна тарілка з фігурним опуклим центром діаметром 300–400 мм. На неї подається повітряний потік зерна, який вона відбиває рівномірно по колу для завантаження на наступні операції. За півроку роботи спостерігається значний поверхневий знос, котрий змінює епюру відбиття зерна на приймачі, що призводить до їх нерівномірного завантаження. Молотки зернодробарок – це сталеві пластини, завішані на роторі, крізь який пропускають зерно. Вони значно зношуються у потоці зерна і створюють дисбаланс ротора, від чого зменшується продуктивність процесу.

Такі деталі прості і недорогі при виготовленні, замість застосування спеціальних матеріалів потребують лише поверхневого зміцнення, яке можна було проводити періодично.

**Поверхнєве зміцнення іонним азотуванням.** У наших дослідженнях [8] іонне азотування чавунних зразків було проведено в середовищі азоту за схемою “катод – зразки, анод – внутрішня поверхня вакуумної камери” у дві стадії: 1) стадія катодного розпилення: напруга – 800 В; густина катодного струму – 1 мА/см<sup>2</sup>; тиск – 12–14 Па (порядку 10<sup>-1</sup> мм рт. ст.); час – 6 хвилин; і 2) стадія насичення азотом: напруга – 800 В; густина катодного струму – 6 мА/см<sup>2</sup>; тиск – 0,9–1 кПа (порядку 10 мм рт. ст.); час – 1,5...3,0 години при температурі 550 °С для недопущення змін у структурі чавуну. Представлені на рис. 3 результати свідчать, що цей метод дозволяє зміцнити поверхню деталі на глибину 100...150 мкм. Подібні дослідження, проведені нами на сталевих деталях, показують більш вагомий результати, а підвищення температури процесу, яке допустимо для деталей переробного обладнання, дозволяє збільшити глибину і твердість зміцненої зони.



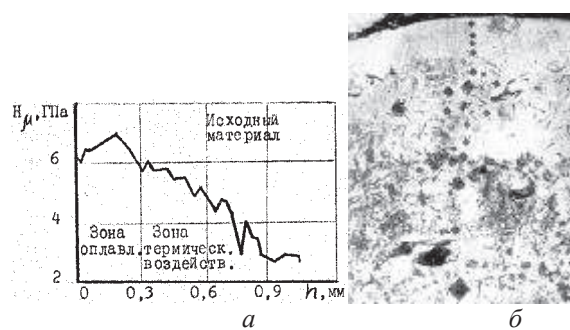
*а – структура поверхневого шару чавуну після іонного азотування. Поперечний шліф, 300<sup>X</sup>;  
б – залежність мікротвердості від глибини зміцненої зони: I – надтонкий шар нітридів заліза;  
II – дифузійний шар твердого розчину азоту у залізі; III – незміцнений шар чавуну.*

**Рис. 3 – Поверхнєве зміцнення іонним азотуванням**

**Поверхнєве зміцнення лазерним опроміненням.** В наших дослідженнях [9] опромінення поверхонь проводили на безперервному CO<sub>2</sub>-лазері при стабільній потужності 1 кВт на діаметр плями 3 мм і лінійній швидкості руху поверхні під плямою опромінювання 12 см/с, що забезпечувало відсутність проплавлення поверхні із зміною форми. Металографічне вивчення шліфу опроміненого чавуну (рис. 4) показує наявність двох зон від поверхні у глибину: зони гартування до 0,3 мм з мікротвердістю 6...7 ГПа і зони термічної дії від 0,3 до 0,7 мм з відповідним монотонним падінням мікротвердості від 7 до 3 ГПа, після чого спостерігається вихідний матеріал із незміненою структурою і мікротвердістю близько 3 ГПа.

В зоні гартування, як свідчить рентгеноструктурний аналіз, іде розчинення графіту, котрий спливає на поверхню, вирівнюється розподіл і збільшується вміст кремнію, зростає вміст  $\gamma$ -Fe і Fe<sub>3</sub>C і падає вміст  $\alpha$ -Fe, котрий можна ідентифікувати як низьковуглецевий мартенсит. На відміну від структури вибіленого чавуну, ця зона являє собою дрібнодисперсну суміш, подібну до евтектики, тобто гартування чавуну при лазерному опроміненні йде за квазіевтектичним механізмом. В умовах швидкого охолодження, зародження і зростання кристалів аустеніту, йде одночасно із кристалізацією евтектичних колоній, а виділення вторинного цементиту не встигає пройти, можливо, під впливом кремнію, котрий зсовує евтектичну точку вліво на діаграмі Fe-Fe<sub>3</sub>C, утворюючи структуру “квазіевтектика-ледебурит”.

Зона термічної дії має неоднорідну структуру, межа між нею і зоною гартування нерівна із-за ефекту контактного плавлення залізної матриці біля включень графіту, причому насиченість зони термічної дії вуглецем знижується щодо глибини, відповідно знижується й мікротвердість. Графітові включення оточені цілим спектром структурних складових, з яких можна ідентифікувати суміш цементиту із аустенітом, мартенситотроостит і ферит.

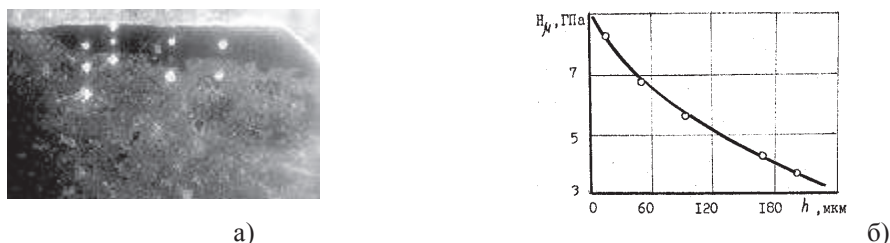


*а – залежність мікротвердості від глибини зміцненої зони; б – структура сірого чавуну, опроміненого лазером. Зверху вниз: зона часткового оплавлення, зона гартування і зона термічної дії. Поперечний шліф, 320<sup>x</sup>*

**Рис. 4 – Поверхнєве зміцнення чавуну лазерним опромінєнням**

**Поверхнєве зміцнення електроіскровим легуванням.** Електроіскрова обробка поверхні дає можливість отримувати заглиблені у поверхню покриття з високою адгезією до основи, майже не окисленими і, на відміну від інших способів, дозволяє формувати покриття на дискретних ділянках поверхні з певним кроком. Це надає покриттю більшу міцність при ударних навантаженнях, що особливо цінне для деталей зернопереробного обладнання.

В наших дослідженнях [10] обробку поверхні проводили приладом електроіскрового легування "Дискрет", застосовуючи графітові електроди. Покриття наносили в автоматичному режимі у вигляді періодичних ділянок. Після шліфування оброблених зразків отримували ділянки поверхні з глибиною зміцнених зон до 0,2 мм і градієнтом мікротвердості від 8 ГПа до значень необробленого чавуну (рис. 5). Як показали дослідження структури зміцнених зон і випробування на зношування, отримання гартованих структур при легуванні графітом дає практично той же ефект, що й лазерне гартування.



*а – структура поверхневого шару чавуну після електроіскрової обробки графітовим електродом. Поперечний шліф, 300<sup>x</sup>; б – залежність мікротвердості від глибини зміцненої зони.*

**Рис. 5 – Поверхнєве зміцнення електроіскровим гартуванням**

**Порівняльні дослідження зносостійкості.** Дослідження зносостійкості зміцнених шарів проводилися у порівнянні із сірим чавуном СЧ20 за схемою "ролик - колодка". Зміцненню піддавали поверхню ролика, котрий обертався у машині тертя із визначеною швидкістю. У якості контртіла застосовували чавунні колодки. Після припрацювання до стабілізації моменту тертя проводили дослідження при граничному режимі змащування. Кожний результат вимірів відповідає середній величині зносу не менше трьох зразків для досягнення похибки не більше 10 %. Інтенсивність зношування представлена як відношення лінійного зносу до шляху тертя. Результати дослідження, приведені у табл. 2, показують підвищення зносостійкості, найбільш вагомі при лазерному опромінєнні і електроіскровому легуванні, котре є найменш витратним.

**Таблиця 2 – Механічне зношування сірого чавуну після поверхневого зміцнення: знос по масі, мг / інтенсивність зношування,  $I_h \cdot 10^{10}$ ; машина тертя СМЦ-2, схема "ролик – колодка", тиск 1,75 МПа, граничне змащування; контртіло тертя – колодка із сірого чавуну**

Матеріал і вид поверхневого зміцнення ролика	Твердість поверхні, $H_v$ , ГПа	Швидкість ковзання					
		1,3 м/с		2,13 м/с		4,16 м/с	
		Ролик	Колодка	Ролик	Колодка	Ролик	Колодка
Незміцнений СЧ	3,0	6,8/0,82	4,5/0,54	5,8/0,69	3,4/0,41	5,0/0,60	2,8/0,34
СЧ + іонне азотування	5,5	6,0/0,72	0,6/0,07	3,6/0,43	1,0/0,12	2,6/0,31	1,8/0,22
СЧ + гартування лазером	7,0	1,4/0,17	1,0/0,11	2,0/0,24	1,8/0,22	3,0/0,36	2,7/0,32
СЧ + ЕІЛ графітом	7,0	3,8/0,46	0,6/0,07	1,9/0,23	0,5/0,06	2,3/0,28	1,8/0,22

**Висновки.** Проведені дослідження показали можливість застосування технологій нанесення надтвердих покриттів і методів поверхневого зміцнення на деталях харчового і переробного обладнання. Виходячи з економічності процесу, розмірів деталей і доступності обладнання найбільш перспективними слід вважати технології утворення надтвердих покриттів з нітриду титану і карбиду хрому для ножів м'ясорізальних машин і клапанів молочних гомогенізаторів. Для деталей зернопереробного обладнання найбільш економічною і дієвою видається технологія поверхневого зміцнення електроіскровим легуванням графіту, яка не потребує дорогого обладнання, невимоглива у застосуванні і може застосовуватись безпосередньо на виробництві для періодичного відновлення деталей.

#### Література

1. Соколов О.Д., Слободанюк О.М. Матеріалознавчі проблеми харчового обладнання та упаковки // Наукові праці ОДАХТ. – Одеса: ОДАХТ. - 2001. – Вип. 22. – С. 195–198.
2. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, А. И. Некоз. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
3. Некоз С. О. Підвищення ефективності роботи і довговічності різального комплексу м'ясорізальних вовчків // Автореферат дис. канд. техн. наук. – Київ: УНУХТ, 2001. – 21 с.
4. Лукасік К. Науково-технічні основи підвищення ефективності роботи та довговічності клапанних гомогенізаторів // Автореферат дис. докт. техн. наук. – Київ: УНУХТ, 2003. – 31 с.
5. Шахбазов О. К., Чабан С. Г., Соколов А. Д. Износостойкость карбидизированных гальванических и вакуумных хромовых покрытий // Защитные покрытия на металлах. – К.: Наукова думка. – 1975. – Вып. 9. – С. 140–143.
6. Соколов А. Д., Пустотина С. Р., Новиков Н. Н., Глухова Л. К. Улучшение прочностных свойств плазменных покрытий введением термореагирующих компонентов // Тракторы и сельхозмашины. – 1988. – № 5. – С. 37–39.
7. Соколов А.Д., Вошлов А.Л. Повышение долговечности поршневых колец нитридными покрытиями // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: Материалы конф. (6 – 8.09.1994, г. Одесса). – К.: УДЭНТЗ, 1994. – С. 50–50.
8. Соколов А. Д. Поверхностное упрочнение поршневых колец азотированием в тлеющем разряде // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1982. – №5. – С. 42–44.
9. Соколов А. Д., Зеленова С. В., Сафонов А. Н. Лазерное упрочнение поршневых колец // Двигателестроение. – 1986. – № 3. – С. 48–49.
10. Соловых Е. К., Ляшенко Б. А., Соколов А. Д. Модернизация машиностроения Украины по технологиям поверхностного упрочнения // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 2. – С. 112–118.