

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.78

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.22

**МЕТОДИ СТРУКТУРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ
ЗАВДАНЬ БАГАТОФАКТОРНОГО ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ****Білозеров В. В., Волков О. О., Князєв С. А., Князєва Г. О., Конотопська Т. Б.,
Краєвська Ж. В., Субботіна В. В., Субботін О. В., Федоренко Г. А.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**

Анотація. У роботі проаналізовано методи структурної інженерії поверхні (ТФЗ, ДТФЗ, ТФЗв, МДО, PVD). Були проведені експериментальні дослідження чорних та кольорових металів. Розглянуто зміну та отримання нових властивостей у поверхневих шарах виробів.

Ключові слова: структурна інженерія поверхні, мікродугове оксидування, анодно-катодний режим, склад електроліту, фазовий склад, рентгеноструктурний аналіз, товщина покриття, твердість, вакуумно-дугове нанесення покриттів.

Вступ

Дотепер створено велику кількість методів поверхневого оброблення матеріалів, що дозволяють визначати склад, структуру та властивості поверхневих шарів і змінювати їх. До структурної інженерії поверхні належить комплекс наукових дисциплін та технологічних методів спрямованої зміни фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалів через модифікування, деформування, нанесення плівок, покриттів, захисних шарів за допомогою різноманітних комбінованих методів. Це дозволяє проектувати поверхневі шари матеріалів, визначати та змінювати їхні властивості.

Аналіз публікацій

Властивості виробів з різних матеріалів і стан їхніх поверхонь взаємопов'язані, зокрема під час експлуатації у процесі тертя [1, 2]. Варто зазначити, що досягнення високих рівнів функціональних властивостей матеріалів забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин, інструментів й елементів конструкцій [3, 4, 5]. Ефективним способом підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь є також використання хіміко-термічних методів насичення поверхневих шарів у виробках з різних матеріалів [6, 7]. Процеси модифікування поверхневого шару зазвичай здійснюються в нерівноважних умовах і є складовою структурної інженерії поверхні. У більшості випадків використання відповідних технологій призводить до зменшення розміру зерен-кристалітів до нанорівня [8, 9]. Значного науково-практич-

ного інтересу набуває напрям зварювання тертям з перемішуванням [10], який є більш складним, але найбільш цікавим в аспекті визначення властивостей у поверхні об'єктів зварювання. Метод термофрикційного зміцнення (ТФЗ) поверхонь – це технологія для створення поверхневих шарів з особливими властивостями [11]. Метод мікродугового оксидування (МДО) розглянуто в джерелах [12, 13], він визначається високими екологічними та економічними показниками. Використання цього методу забезпечує найбільшу ефективність отримання високотвердих захисних покриттів на вентильних металах і сплавах (Al, Ti, Mg, Ta, Nb, Zr) [14–18]. Особливістю мікродугового оксидування є використання в процесі формування покриття мікродугових розрядів. Одночасно поєднуються плазмовий та електрохімічний механізми формування оксидного шару [19], і поверхневий шар матеріалу, що оброблюється, перетворюється на високотемпературні кристалічні оксиди, які міцно зчеплені з основою та визначаються високою стійкістю до корозії і зношування. Таким чином, для різних класів матеріалів необхідно визначити аспект оптимальності використання тих чи інших технологій модифікування поверхневих шарів, де передбачено різні підходи до забезпечення необхідних їхніх властивостей [20]. Одним з прогресивних та ефективних методів зміцнення поверхні деталей є вакуумно-дугове нанесення покриттів. Це забезпечується високим ступенем іонізації парів металу у вакуумно-дуговому розряді (майже 100 %), що дає можливість здійснити очи-

щення під час подачі високого потенціалу зміщення до підкладки способом розпилення поверхні деталей бомбардуванням іонами плазми випаровуваного матеріалу катода. Процес такого попереднього очищення активує поверхню підкладки і дає можливість отримати високу адгезію [21, 22]. Аналіз запропонованих методів структурної інженерії поверхні матеріалів і виробів доводить, що підвищення експлуатаційних властивостей багатьох видів деталей машин, інструменту та елементів конструкцій визначається властивостями поверхневих шарів деталей (твердістю, зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, межею витривалості, контактною жорсткістю, корозійною стійкістю тощо). Існують різноманітні підходи щодо реалізації структурної інженерії поверхні, які відрізняються один від одного, але всі вони здатні кардинально змінювати властивості в поверхні об'єктів.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є аналіз різноманітних методів впливу на поверхню об'єктів з чорних та кольорових сплавів, їхнього впливу на зміну структурного стану та властивостей поверхневих шарів, визначення особливостей кожної із розглянутих технологій.

Основний матеріал дослідження

Напрямок зварювання та наплавлення тертям визначається тим, що основні процеси здійснюються в поверхневих шарах конструкційних елементів, що з'єднані один з одним. Такі зварювальні процеси застосовують для отримання нерознімних з'єднань, їх можна класифікувати залежно від використання певного типу тертя:

– зварювання в процесі лінійного тертя, тобто під час обертальної дії дотичних частин чи однієї з них під певним тиском, що сприяє швидкому локальному розігріванню, розплавленню та формуванню нерознімного з'єднання;

– зварювання в процесі радіального тертя, під час якого стики деталей, що з'єднують, розігрівають обертовим кільцем, яке одягнене зовні і під дією тертя генерує температуру рівня плавлення з формуванням нерознімного з'єднання після охолодження;

– штифтове зварювання в процесі тертя, під час якого штифт, що обертається, розігріває деталі в місці їхнього стику й під дією високої температури відбувається локальне

розплавлення з проникненням штифта в деталі, які з'єднують. У процесі охолодження формується нерознімне з'єднання.

У процесі зварювання тертям з перемішуванням з'єднання металів відбувається внаслідок розігрівання тертям у зоні зварювання. Основним інструментом для такого зварювання є металевий стрижень, що складається з двох частин: робочої частини (бура) та обмежувальника (запличика). Під час заглиблення робочої частини цього інструмента, що обертається, в матеріал відбувається значне його нагрівання. Вертикальну подачу інструмента обмежує запличик, не дозволяючи здійснити процес зварювання наскрізь. У зоні нагрівання матеріал значно збільшує свою пластичність, набуває стану текучості і завдяки натисненню обмежувальним запличиком формує єдину масу. Такий метод не передбачає використання різноманітних додаткових середовищ, які в процесі горіння дуги чи газового струменя можуть виділяти в атмосферу продукти згоряння, що притаманне багатьом стандартним методам зварювання та наплавлення. А отже, є достатньо екологічним і перспективним, оскільки дозволяє ще й контролювати в певному діапазоні властивості матеріалів у з'єднаннях, які отримують. Існує багато відмінностей в технологічних підходах до реалізації подібних процесів, проте основна ідея цього методу наведена на рис. 1.

Ще одним методом модифікування поверхонь є технологія термофрикційного зміцнення (ТФЗ). Схематично цей метод наведений на рис. 2). ТФЗ не передбачає додаткового легування матеріалу, який зміцнюють, що визначає цей метод як екологічний, ефективний та перспективний, зокрема й з погляду економічності. Варто зазначити, що фрикційно-деформаційна складова цього методу може бути використана як для первинного, так і для додаткового зміцнення матеріалів, залежно від потреб щодо властивостей виробів з них. Це передбачає використання різних режимів оброблення для кожного з цих випадків. Отримані експериментальні результати демонструють, що метод ТФЗ відрізняється від інших здатністю суттєво підвищувати твердість матеріалів, які вже були зміцнені термічним способом, до максимально можливого щодо термічності рівня. Так, наприклад, отримані результати, де термофрикційне зміцнення зразків, які виготовлені зі сталі 65Г, дозволило досягти збільшення мікрот-

вердості їхнього поверхневого шару до рівня 22 ГПа. Крім того, є результати, які підтверджують отримання в такий спосіб досить значного рівня поверхневого зміцнення сталей різних класів [7]. Водночас маємо стабільність високого рівня додаткового зміцнення. На рис. 3 подана мікроструктура перерізу зразка зі сталі У8А після ДТФЗ зі ступенем та типом зміцнення поверхні. Отже, це результат додаткового зміцнення поверхні сталі У8А з рівня мікротвердості 7,2 ГПа до 14,7 Па за використання методу ДТФЗ після її зміцнення термічним способом до майже максимально можливого рівня.

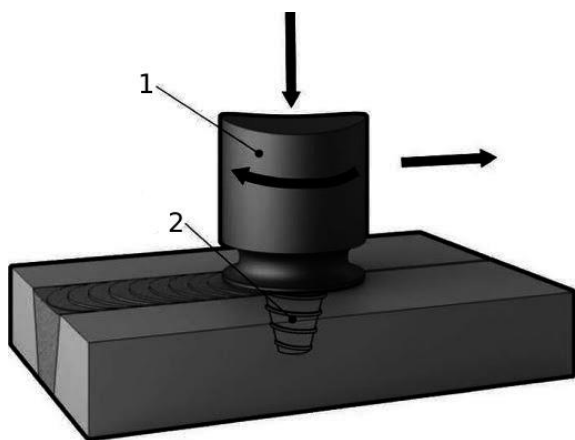


Рис. 1. Схема процесу зварювання тертям з перемішуванням; 1 – обмежувальник; 2 – робоча частина інструмента

Достатньо перспективним на сьогодні є метод мікродугового оксидування (МДО), який демонструє високі екологічні показники та може бути доволі економічним, залежно від умов електролізу. Використання цього методу забезпечує найбільшу ефективність отримання високотвердих захисних покриттів на вентильних металах і сплавах (Al, Ti, Mg, Ta, Nb, Zr). МДО – електрохімічний метод, що дозволяє формувати принципово відмінні за властивостями багатофункціональні керамікоподібні покриття з широким комплексом таких властивостей, як твердість, зносостійкість, корозійна стійкість, електроізоляційність і декоративність тощо. Поєднується плазмовий і електрохімічний механізми формування оксидного шару, і поверхневий шар матеріалу, що оброблюється, перетворюється на високотемпературні кристалічні оксиди, які міцно зчеплені з основою та визначаються високою стійкістю до корозії і зношування.

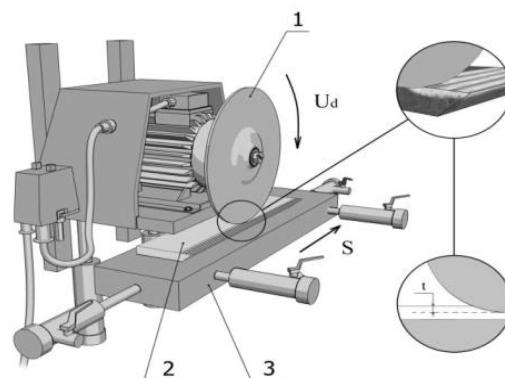


Рис. 2. Схема процесу додаткового термофрикційного зміцнення (ДТФЗ); 1 – змцнювальний диск; 2 – об'єкт зміцнення; 3 – магнітна плита верстата

МДО – складний процес, під час якого властивості покриттів залежать від багатьох факторів, зокрема від складу електроліту, умов поляризації напруги, густини струму, тривалості оброблення тощо. Але невирішеними є питання щодо впливу складу матеріалів, які оброблюються, складу електроліту, технологічних факторів на процеси структуро- та фазоутворення та властивості покриттів. Вирішення цих питань дозволить прискорити практичне впровадження. Розглянемо метод МДО більш детально.

Мета цієї частини дослідження полягає в розробленні науково-технологічних принципів формування багатофункціональних покриттів на вентильних металах з використанням методу мікродугового оксидування (МДО).

Для цього вирішувались такі завдання:

- оптимізування умов електролізу, які забезпечують формування покриттів у режимі мікродугових розрядів на алюмінієвих сплавах;
- визначення закономірності формування товщини, фазового складу й властивостей покриттів залежності від умов електролізу (склад електроліту, густина струму, тривалість оброблення);
- визначення рівня впливу фазового стану покриттів на зносостійкість і твердість;
- визначення можливостей використання МДО-покриттів та розроблення рекомендації щодо використання технології мікродугового оксидування для підвищення терміну використання виробів.

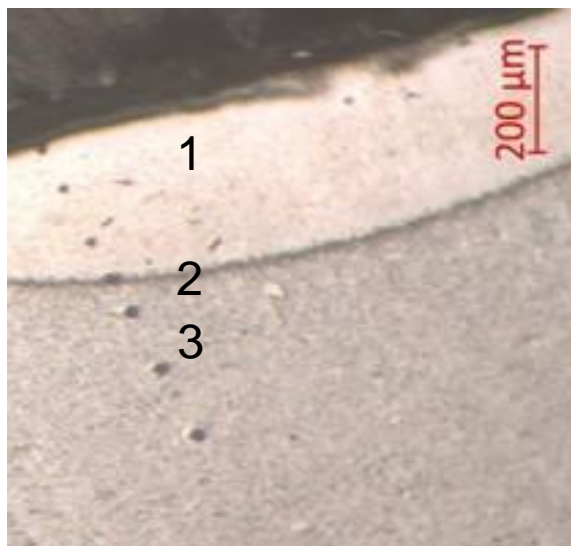


Рис. 3. Результат ДТФЗ – сформований поверхневий зміцнений шар в перерізі зразка з відбитками від вимірювання мікротвердості (сталь У8А): 1 – зміцнений поверхневий шар; 2 – знеміцнений підповерхневий шар; 3 – основна частина зразка

Формування покриттів здійснювалось на обладнанні, в якому забезпечувався процес мікродугових розрядів (рис. 4). Схема обладнання наведена рис. 5.



Рис. 4. Процес мікродугового оксидування

Для забезпечення режиму мікродугового оксидування використовували електроліти,

які складалися з їдкого калію (KOH), рідкого скла (Na_2SiO_3) та дистильованої води.

МДО-оброблення здійснювали за густини струму $5\text{--}50 \text{ А/дм}^2$ з тривалістю процесу до 3 годин.

Для дослідження структури та властивостей використовували методи металографії, рентгеноструктурного аналізу, методи вимірювання твердості, методи вимірювання товщини покриття.

Мікродуговому оксидуванню піддавали сплави алюмінію, зокрема низьколеговані сплави алюмінію АД1 і АВ (табл. 1).

МДО-оброблення сплаву АД1 здійснювали в лужно-силікатному електроліті, що дозволило сформувати покриття, товщиною до 100 мкм , яка залежить від складу електроліту та густини струму. Для прискорення швидкості нарощування покриття необхідно збільшувати густину струму. Збільшення густини струму від 5 А/дм^2 до 50 А/дм^2 призводить до збільшення швидкості формування товщини в 5 разів (рис. 6).

Особливістю МДО-покриттів є їхня шарова будова, що складається з технологічного й робочого шарів. Технологічний шар пористий, незносостійкий, легко видаляється на абразивному папері та становить $30\text{--}40 \%$ від загальної товщини (рис. 7).

Рентгеновський фазовий аналіз демонструє, що покриття на сплаві АД1 має кристалічну будову, основною фазою якої є $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 8).

У разі збільшення концентрації Na_2SiO_3 складової в електроліті у покритті підвищується вміст кристалічної фази муліту.

Робочий шар монолітний та зносостійкий. Фазовий склад технологічного й робочого шарів відрізняються один від одного.

Подібні дослідження були здійснені на низьколегованому сплаві алюмінію АВ. Варто зазначити, що цей сплав також належить до низьколегованих сплавів алюмінію, однак з іншим складом легувальних елементів, порівнюючи зі сплавом АД1, і більш високим рівнем легування за основними елементами (приблизно 1% у сплаві АВ, порівнюючи з менш ніж $0,1 \%$ у сплаві АД1).

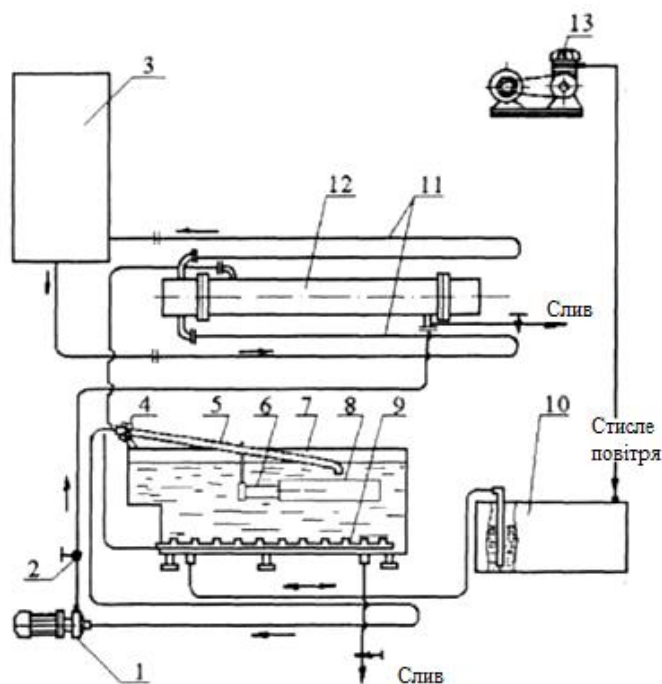


Рис. 5. Схема обладнання для мікродугового оксидування: 1 – насос перекачування електроліту; 2 – кран шарів; 3 – холодильна машина; 4 – трійник поворотний; 5 – забірний трубопровід; 6 – кронштейн кріплення деталі; 7 – ванна електролітична; 8 – деталь, що оброблюється; 9 – труба для передачі повітря до ванни; 10 – повітряний фільтр; 11 – ізолювальні трубопроводи; 12 – теплообмінник; 13 – компресор

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів, що досліджуються, % (ГОСТ 4784-97)

Матеріал	Al	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Ti	Zn
АД1	99,3	0,05	0,05	0,3	0,3	0,25	0,15	0,1
АВ	95,95–98,8	0,1–0,5	0,45–0,9	0,5	0,5–1,2	0,15–0,35	0,15	0,2

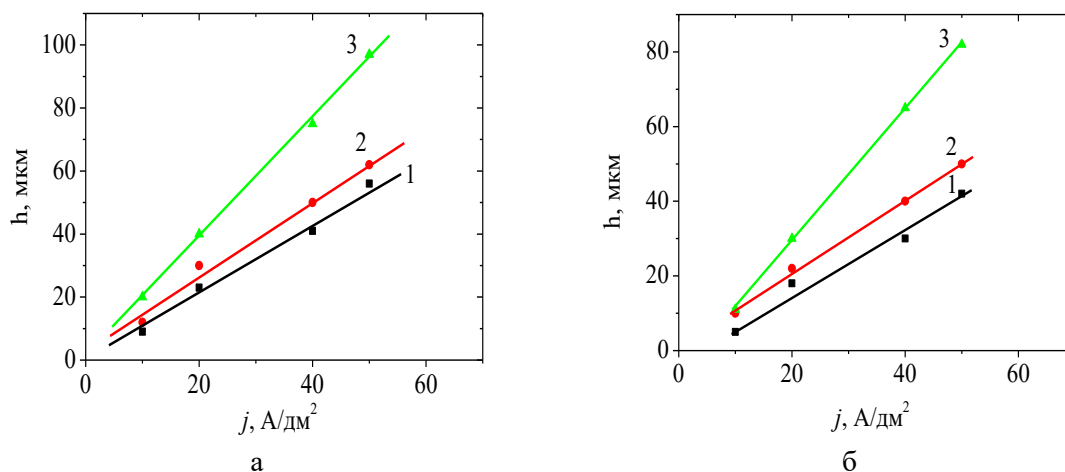


Рис. 6. Вплив густини струму на (а) загальну товщину і (б) робочу товщину покриттів на алюмінії АД1 (тривалість 30 хв): 1 – електроліт КОН – 1 г/л + Na_2SiO_3 – 3 г/л; 2 – електроліт КОН – 1 г/л + Na_2SiO_3 – 6 г/л; 3 – електроліт КОН – 2 г/л + Na_2SiO_3 – 12 г/л 60 хв (електроліт: 1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3). Зйомка в К α -Cu

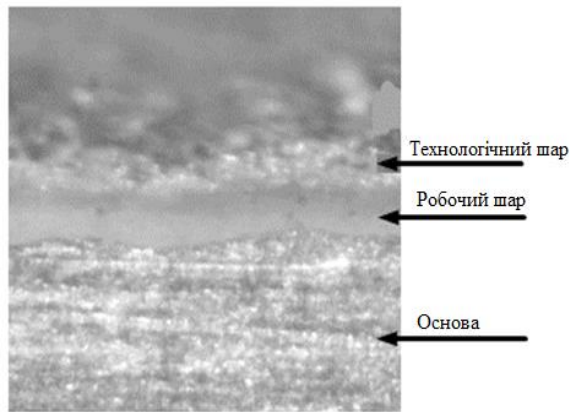


Рис. 7. МДО-покриття на алюмінієвому сплаві АД1

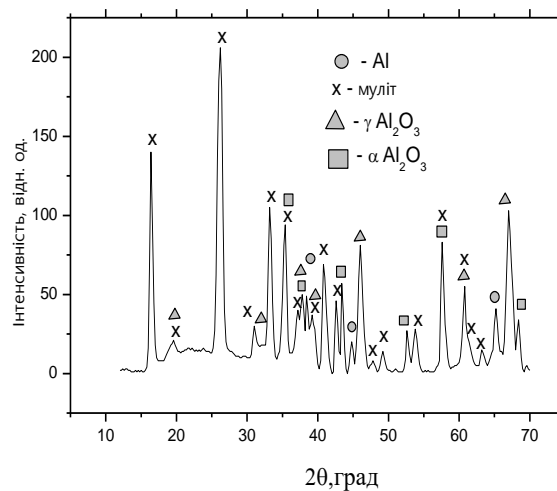


Рис. 8. Фрагмент дифракційного спектра МДО-покриття на сплаві АД1 під час оксидування зі щільністю струму 20 A/дм^2 протягом 60 хв (електроліт: $1 \text{ г/л KOH} + 6 \text{ г/л Na}_2\text{SiO}_3$). Зйомка в $K\alpha\text{-Cu}$

На рис. 9 наведені залежності загальної товщини покриття, що сформовано в електроліті складу $\text{KOH} - 1 \text{ г/л} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 - 6 \text{ г/л}$ на сплаві АВ покриття (рис. 9, а), і товщини робочого шару (рис. 9, б) від тривалості оксидування за різної густини струму. Визначені тенденції збільшення швидкості росту товщини з підвищенням густини струму наявні також і в процесі оксидування сплаву АВ.

Для покриттів, які отримані за різної густини струму в електроліті розчину $\text{KOH} - 1 \text{ г/л} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 - 6 \text{ г/л}$, здійснено рентгенофазовий аналіз стану покриттів.

На рис. 10 наведено результати такого дослідження.

Фазовий склад покриттів, що сформовані за густини струму 5 A/дм^2 майже до найбільших товщин, складається з однофазної модифікації оксиду алюмінію $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 10, а). За більшої густини струму та тривалості більше ніж 90 хв формується трифазний

Першою характеристикою для аналізу мікродугового оксидування є товщина сформованих покриттів та її залежність від основних технологічних параметрів електролізу (тривалість процесу, густина струму та склад електроліту).

Залежності товщини МДО-покриттів від тривалості процесу є майже лінійними. Кінетичні параметри швидкості збільшення покриття залежно від густини струму на зразку можна навести як графіки для загальної швидкості росту та швидкості росту робочого шару.

стан покриття (рис. 10, б) з $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Такий самий трифазний стан (але за умови відносно меншої тривалості оксидування 40 хв і менше) має МДО-покриття на сплаві АВ за його оксидування з найбільшою щільністю струму 50 A/дм^2 (рис. 10, в).

За малої густини струму в легованих сплавах АВ підвищується питомий вміст фази $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (до майже 100%), а в покриттях, що сформовані за більшої густини струму, зменшується питомий вміст мулітної складової і збільшується вміст найбільш твердої поліморфної модифікації оксиду алюмінію – фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунду).

Метод вакуумно-дугового нанесення покриттів використовують у промисловості через високу адгезію між підкладкою та нанесеним покриттям.

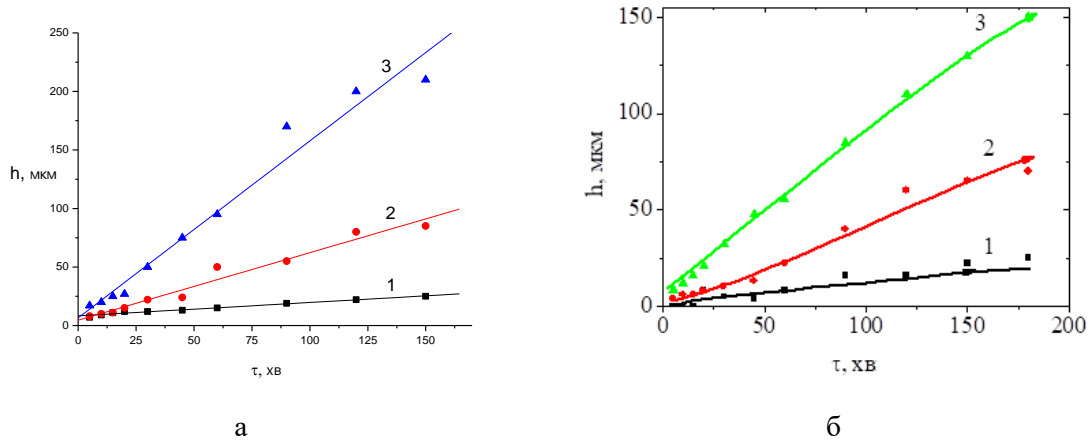


Рис. 9. Залежність загальної товщини покриття (а) та товщини робочого шару (б) від тривалості оброблення сплаву алюмінію АВ (електроліт: КОН – 1 г/л + Na_2SiO_3 – 6 г/л): 1 – густина струму 5 А/дм²; 2 – густина струму 20 А/дм²; 3 – густина струму 50 А/дм²

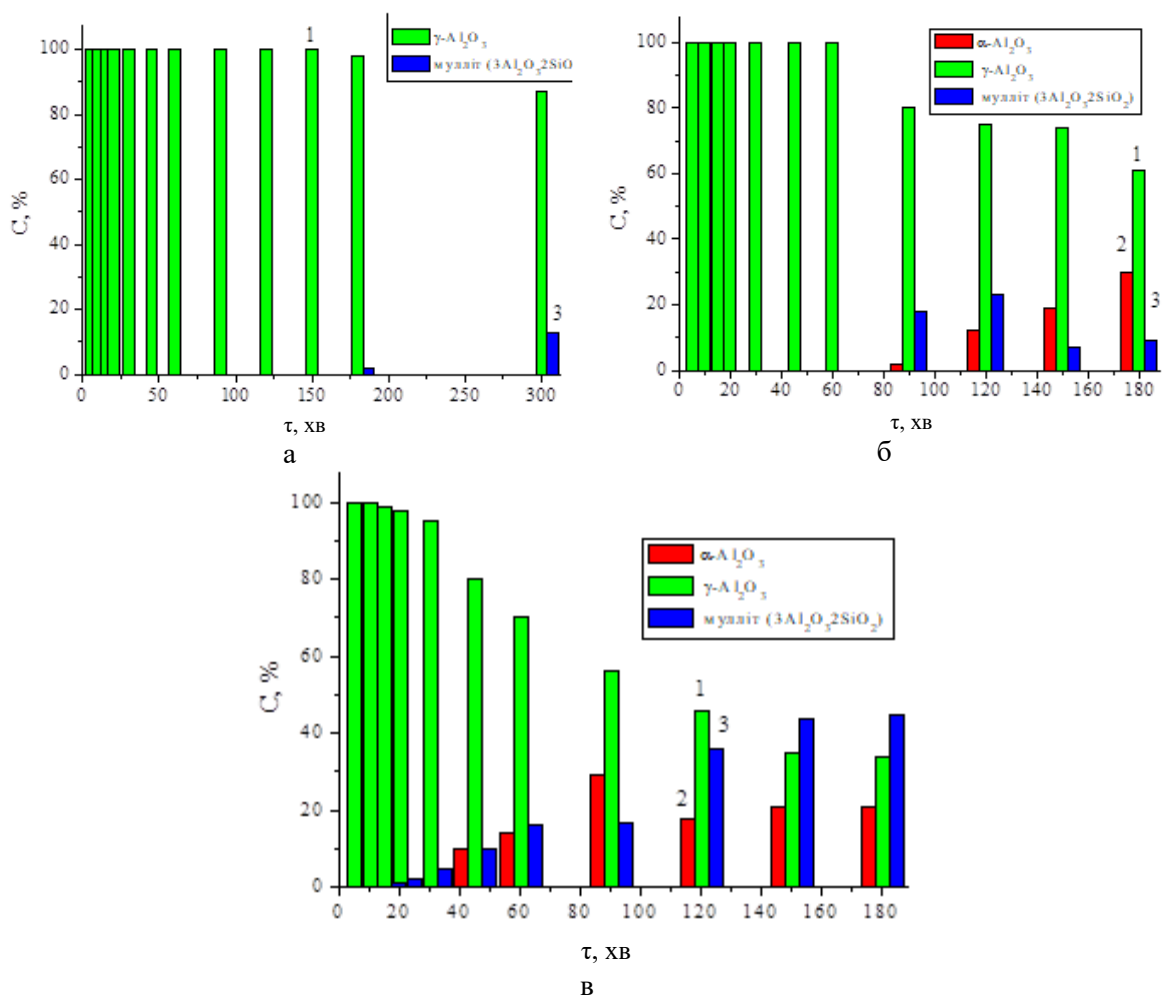


Рис. 10. Залежність фазового складу від тривалості окисдування в електроліті КОН – 1 г/л + Na_2SiO_3 – 6 г/л за різної густини струму а – 5 А/дм²; б – 20 А/дм²; в – 50 А/дм². 1 – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; 2 – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$; 3 – муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

Осадження покриттів здійснювалось на вакуумно-дуговій установці «Булат-6» за різними технологічними режимами. Як підкладку під час осадження використовували по-

ліровані пластини, розміром $20 \times 20 \times 3$ мм, виготовлені зі сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т.

Як матеріал катода (матеріал покриття) використовували хром та нітрид хрому (для порівняльного аналізу одно- та двокомпонентних систем). Зразки перед очищенням промивали лужним розчином в ультразвуковій ванні та нефрасом С2-80/120.

Очищення поверхні здійснювали в процесі подачі від'ємного потенціалу зміщення – 1 300 В протягом 10–15 хв, час осадження самого покриття складав 1,5–2,0 години, що є прийнятним для впровадження в промисловість.

Металографічні дослідження демонструють, що однокомпонентне покриття є продуктивним щодо товщини шару, але воно має досить дефектну структуру, зокрема велику кількість мікротріщин і мікронесуцільностей, що значно буде знижувати конструкційну міцність, а також трибологічні властивості. Якщо збільшувати товщину шарів (до 100 мкм) способом осадження, це призведе до руйнування покриття, тобто до розтріскування та відшарування.

Отже, нанесення однокомпонентної системи є недоцільним, оскільки досягти високих механічних властивостей ця система покриттів не дозволяє. Максимальна твердість на таких покриттях становила майже 2 ГПа. Однак ця система була досліджена як система для порівняння, тобто вона є первинною для більш складної системи покриттів.

Так, покриття з нітриду хрому є якісним за властивостями. Було отримане суцільне й рівномірне покриття CrN, товщиною 21 мкм (рис. 11), за від'ємного потенціалу зсуву $U_b = -30$ В та тиску азотної атмосфери $P = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Аналіз демонструє, що на поверхні наявна незначна кількість крапельної складової, однак всередині самого покриття вона відсутня (рис. 11).

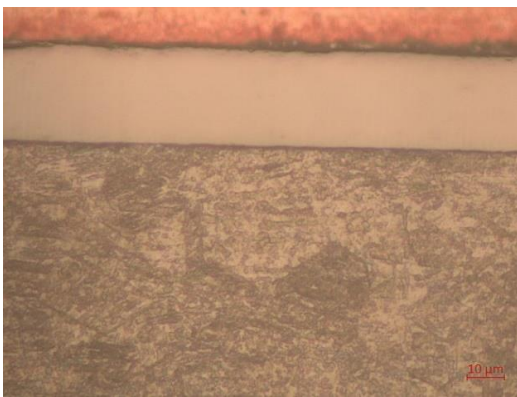


Рис. 11. Покриття системи CrN, товщиною 21 мкм (x 1000)

Рентгеноструктурні дослідження демонструють, що покриття складається з фази CrN з віссю текстури [200]. Під час аналізу субструктурних характеристик було визначено розмір кристалітів, що дорівнює 6,0–6,7 нм.

Висновки

У роботі визначено особливості та результати використання технологій модифікування структур і властивостей поверхонь, а також доцільність використання того чи іншого методу щодо матеріалів різних класів.

Визначено також результат додаткового зміцнення поверхні сталі У8А з рівня мікротвердості 7,2 ГПа до 14,7 ГПа під час використання методу ДТФЗ після її зміцнення термічним способом до майже максимально можливого рівня. Наведено мікроструктуру перерізу зразка із попередньо загартованої сталі У8А після ДТФЗ зі ступенем та типом зміцнення поверхні. Зазначено, що в дослідженнях досягнуто стабільно ефективного зміцнення сталей різних класів, навіть до рівня 22 ГПа в сталі 65Г.

Дослідження покриттів на низьколегованих сплавах алюмінію демонструє, що за допомогою методу МДО в лужно-силікатному електроліті можна отримати товщину покриття до 300 мкм зі швидкістю нарощування покриття ~ 2 мкм/хв. і твердістю покриття від 10–20 ГПа. Покриття мають високу адгезію з основою, шарову будову, їхні властивості визначаються властивостями основного шару. Покриття має кристалічну будову, складається з фаз $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), співвідношення між фазами залежить від умов електролізу.

Визначено, що першою фазою фазоутворення є фаза $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, яка в процесі подальшого нарощування покриття перетворюється на фазу $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ або взаємодіє з оксидом кремнію та утворює фазу муліт.

Проаналізовано можливість отримання якісного твердого покриття на основі нітриду хрому, яке на відміну від попередніх технологій забезпечує мінімальну зміну розмірів деталей за умови високої твердості поверхневого шару. Якість отриманого покриття суттєво залежить від режимів його нанесення.

Основними параметрами є потенціал зсуву $U_b = -30$ В та тиск азотної атмосфери $P = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Торр. Ця технологія може бути використана для зміцнення прецизійних деталей.

Література

1. Features of transition modes of friction surfaces with partially regular microrelief / Radionenko O., Kindrachuk M., Tisov O., Kryzhanovskiy A. *Aviation*. 2018. Vol. 22. Iss. 3. P. 86–92.
2. Creation of a diffusion barrier at the interphase surface of composite coatings reinforced with carbon nanotubes / Panarin V. Y., Svavil'nyu M.Y., Khomynych A. I., Kindrachuk M. V. *Journal of nano- and electronic physics*. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 06023.
3. Волков О. О. Роль вихідного стану та концентрації вуглецю при термофрикційному зміцненні (ТФЗ) сталей. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Bulletin of the National Technical University "KhPI"». Series «Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy»: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». 2020. № 2 (1356). С. 3–6.
4. Additional strengthening of “screper” jewelry tool using friction / Volkov O. Kraevska Z., Vasilchenko A., Hannichenko T. *Solid state phenomena*. 2022. Vol. 334. P. 100–106.
5. Application of thermo-frictional and chemical-thermal methods treatments for surface strengthening of materials / Levterov A., Nechitaylo J., Plugina T., Volkov O: *materials science forum*. 2021. Vol. 1038. P. 93–99.
6. Alternative strengthening of jewelry tools using chemical-thermal and local surface treatments / *materials science forum*. 2021. Vol. 1038. P. 68–76.
7. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Харків, 2020. 25 с.
8. Effect of tantalum on the texture of copper vacuum condensates / Glushchenko M. A., Belozyorov V. V., Sobol O. V., Subbotina V. V. *Journal of nano- and electronic physics*. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 02015.
9. Effect of micro-groove on microstructure and performance of MAO ceramic coating fabricated on the surface of aluminum alloy / Wang J., Huang S., Huang H., He M. *Journal of alloys and compounds*. 2019. Vol. 777. P. 94–101.
10. Galvao I., Leal R.M., Loureiro A. Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets. *Journal of materials processing technology*. 2013. Vol. 213. Iss. 2. P. 129–135.
11. Volkov O. A. Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2016. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.
12. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition / Belozorov V., Sobol O., Mahatilova A., Subbotina V. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 5. № 12(89). P. 52–57.
13. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α - Al_2O_3 phase in mao-coatings on aluminum / Subbotina V., Al-Qawabehe U. F., Belozorov V., Sobol' O. V. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 6. № (12–102). P. 6–13.
14. Formation mechanism of oxide layer on AZ31 Mg alloy subjected to micro-arc oxidation considering surface roughness / Nashrah N., Kamil M.P., Yoon D. K., Kim Y. G. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 497. P. 143772.
15. Investigation of the influence of technological conditions of microarc oxidation of magnesium alloys on their structural state and mechanical properties / Belozorov V., Mahatilova A., Sobol' O., Subbotina V. *Eastern european journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 2. Iss. 5 (86). P. 39–43.
16. Use of the method of micro-arc plasma oxidation to increase the antifriction properties of the titanium alloy surface / Subbotina V. V., Sobol' O. V., Belozorov V. V., Makhatilova A. I. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 03025.
17. Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel–titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process / Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. Iss. 9. P. 7333–7355.
18. Effect of micro-arc oxidation on fretting wear behavior of zirconium alloy exposed to high temperature water / Lai P., Zhang H., Zhang L., Zeng Q. *Wear*. 2019. Vol. 424–425. P. 53–61.
19. The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy / Martin J., Nominé A. V., Stef J., Nominé A.: *materials and Design*. 2019. Vol. 178. P. 107859.
20. Effect of exothermic addition (CuO-Al) on the structure, mechanical properties and abrasive wear resistance of the deposited metal during self-shielded flux-cored arc welding / Trembach B., Grin A., Subbotina V., Vynar V. *Tribology in Industry*. 2021. 43(3). P. 452–464.
21. Structure and corrosion resistance of vacuum-arc multi-period CrN/Cu, ZrN/Cu, and NbN/Cu coatings / Postelnyk H. O., Sobol' O. V., Stolbovoy V. A., Serdiuk I. V. *Problems of atomic science and technology*. 2020. № 2 (126). P. 139–144.

22. Improving the high-temperature oxidation resistance of CrN coating by gradient deposition considering internal stress effects / Meng C., Jiang J., Ma J., Zhang T. Nuclear materials and energy. 2023.

References

1. Features of transition modes of friction surfaces with partially regular microrelief / Radionenko O., Kindrachuk M., Tisov O., Kryzhanovskiy A. Aviation. 2018. Vol. 22. Iss. 3. P. 86–92.
2. Creation of a diffusion barrier at the interphase surface of composite coatings reinforced with carbon nanotubes / Panarin V. Y., Svavil'nyy M.Y., Khominych A. I., Kindrachuk M. V. Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 06023.
3. Volkov O. O. Rol vykhidnoho stanu ta kontsentratsii vuhletsiu pry termofryktsiinomu zmitsnenni (TFZ) stalei. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya «Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobudu-vanni ta metalurhii = Bulletin of the National Technical University "KhPI"». Series «Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy»: zb. nauk. pr. Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». 2020. № 2 (1356). S. 3–6.
4. Additional strengthening of “screper” jewelry tool using friction / Volkov O., Kraevska Z., Vasilchenko A., Hannichenko T. Solid state phenomena. 2022. Vol. 334. P. 100–106.
5. Application of thermo-frictional and chemical-thermal methods treatments for surface strengthening of materials / Levterov A., Nechitaylo J., Plugina T., Volkov O: materials science forum. 2021. Vol. 1038. P. 93–99.
6. Alternative strengthening of jewelry tools using chemical-thermal and local surface treatments / materials science forum. 2021. Vol. 1038. P. 68–76.
7. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Харків, 2020. 25 с.
8. Effect of tantalum on the texture of copper vacuum condensates / Glushchenko M. A., Belozyorov V. V., Sobol O. V., Subbotina V. V. Journal of nano- and electronic physics. 2017. Vol. 9. Iss. 2. P. 02015.
9. Effect of micro-groove on microstructure and performance of MAO ceramic coating fabricated on the surface of aluminum alloy / Wang J., Huang S., Huang H., He M. Journal of alloys and compounds. 2019. Vol. 777. P. 94–101.
10. Galvao I., Leal R.M., Loureiro A. Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets. Journal of materials processing technology. 2013. Vol. 213. Iss. 2. P. 129–135.
11. Volkov O. A. Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2016. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.
12. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition / Belozorov V., Sobol O., Mahatilova A., Subbotina V. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 5. № 12(89). P. 52–57.
13. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α - Al_2O_3 phase in mao-coatings on aluminum / Subbotina V., Al-Qawabeha U. F., Belozorov V., Sobol' O. V. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2019. Vol. 6. № (12–102). P. 6–13.
14. Formation mechanism of oxide layer on AZ31 Mg alloy subjected to micro-arc oxidation considering surface roughness / Nashrah N., Kamil M.P., Yoon D. K., Kim Y. G. Applied Surface Science. 2019. Vol. 497. P. 143772.
15. Investigation of the influence of technological conditions of microarc oxidation of magnesium alloys on their structural state and mechanical properties / Belozorov V., Mahatilova A., Sobol' O., Subbotina V. Eastern european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 2. Iss. 5 (86). P. 39–43.
16. Use of the method of micro-arc plasma oxidation to increase the antifriction properties of the titanium alloy surface / Subbotina V. V., Sobol' O. V., Belozorov V. V., Makhatilova A. I. Journal of nano- and electronic physics. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 03025.
17. Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel–titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process / Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M. Journal of Materials Science. 2019. Vol. 54. Iss. 9. P. 7333–7355.
18. Effect of micro-arc oxidation on fretting wear behavior of zirconium alloy exposed to high temperature water / Lai P., Zhang H., Zhang L., Zeng Q. Wear. 2019. Vol. 424–425. P. 53–61.
19. The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy / Martin J., Nominé A. V., Stef J., Nominé A.: materials and Design. 2019. Vol. 178. P. 107859.
20. Effect of exothermic addition (CuO-Al) on the structure, mechanical properties and abrasive wear resistance of the deposited metal during self-shielded flux-cored arc welding / Trembach B., Grin A., Subbotina V., Vynar V. Tribology in Industry. 2021. 43(3). P. 452–464.
21. Structure and corrosion resistance of vacuum-arc multi-period CrN/Cu, ZrN/Cu, and NbN/Cu

coatings / Postelnyk H. O., Sobol' O. V., Stolbovoy V. A., Serdiuk I. V. Problems of atomic science and technology. 2020. № 2 (126). P. 139–144.

22. Improving the high-temperature oxidation resistance of CrN coating by gradient deposition considering internal stress effects / Meng C., Jiang J., Ma J., Zhang T. Nuclear materials and energy. 2023.

Білозеров Валерій Володимирович, к.т.н., доцент, професор кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35,

Волков Олег Олексійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: volkovoleg1978@gmail.com,

Князев Сергій Анатолійович, к.т.н., майстер виробничого навчання кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35,

e-mail: obmeninfoserg@ukr.net,

Князєва Ганна Олександрівна, Ph. D., старший викладач кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35,

e-mail: annapostelnik@ukr.net,

Конотопська Тетяна Борисівна, завідувач відділом стандартизації та метрології, тел.: (057) 707–61–75, e-mail: konotopskaya@kpi.kharkov.ua

Красєвська Жанна Владиславівна, аспірант кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: 3294280@gmail.com,

Субботіна Валерія Валеріївна, д.т.н., професор, завідувач кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com,

Субботін Олександр Володимирович, старший викладач кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35,

e-mail: subbotin.alex95@gmail.com,

Федоренко Ганна Анатоліївна, інж. I кат. кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707–64–35, e-mail: ann161169@gmail.com,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Methods of structural surface engineering in solving problems of multifactorial improvement of materials performance

Abstract. Problem. Structural surface engineering encompasses a complex of scientific disciplines and technological methods of directed change of physical and chemical properties of materials surface layers by modification, deformation, application of films, coatings, protective layers, with the help of various combined methods. In the course of the study several different methods of structural engineering of the surface are considered for solving problems of multifactor increase of the level of exploitation characteristics of materials. The methods described in the article are characterized by different physics of the process on the way to obtaining the result, but are aimed at modifying the structure and properties

of the surfaces to which they are applied. **Goal.** Consideration of different methods of influence on the surface of ferrous and non-ferrous alloy objects, analysis of their influence on the modification of the structural state and properties of the surface layers that were investigated, discussion of the peculiarities of each of the considered technologies. **Method.** The first direction includes technologies that include a friction component, namely thermofriction treatment (TFT) for thermofriction hardening (TFH), supplementary thermofriction hardening (STH) or thermofriction welding (TFW). The second direction is the technology involving the use of anodic-cathodic electrolysis mode in alkali-silicate electrolyte – micro-arc oxidation (MAO). The third direction is the technology of vacuum-arc PVD-method, which involves obtaining chromium coatings. The article describes the features and results of application of such technologies, as well as the expediency of using this or that method for materials of different classes, schemes of the corresponding installations are presented. **Results.** The result of additional hardening of U8A steel surface from the microhardness level of 7.2 GPa to 14.7 GPa by DTFZ method after its thermal hardening practically to the maximum possible level is shown. The microstructure of the cross section of the pre-hardened U8A steel sample after DTFZ is presented, where the degree and character of surface hardening can be reliably seen. It is emphasized that in previous studies a consistently effective hardening of steels of various classes was achieved, up to a level of 22 GPa in 65G steel. The structure and properties of coatings on low-alloy aluminum alloys AB and AD1 formed in alkali-silicate electrolyte in the anodic-cathodic mode of MDO in the process of application of the microarc oxidation method have been studied. It is shown that the method of MDO in alkali-silicate electrolyte allows to obtain coatings with thickness up to 300 μm , coating growth rate $\sim 2 \mu\text{m}/\text{min}$ and coating hardness 10-20 GPa. The coatings have high adhesion to the substrate, have a layered structure, the properties of the coatings are determined by the properties of the base layer. The coatings have a crystalline structure and consist of the following phases: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), the ratio between the phases depends on the electrolysis conditions. It is established that phase formation begins with the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase, which in the process of further growth of the coating turns into the $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase or interacts with silicon oxide to form the mullite phase. The possibility of obtaining high-quality chromium nitride-based hard coating by vacuum-arc sputtering is shown.

Keywords: structural surface treatment, microarc oxidation, anodic-cathodic mode, electrolyte composition, phase composition, X-ray analysis, coating thickness, hardness, vacuum-arc coating.

BelozeroV Valeriy, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35,

Volkov Oleh, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: volkovoleg1978@gmail.com,

Knyazev Serhii, Candidate of Engineering Sciences, Master of Industrial Training, Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: obmeninfo Serg@ukr.net,

Knyazeva Hanna, Ph.D., Senior Lecturer at the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: annapostelnik@ukr.net,

Konotopska Tetiana, Head of the Department of Standardization and Metrology, tel.: (057) 707-61-75,

e-mail: konotopskaya@kpi.kharkov.ua,

Kraevska Zhanna, postgraduate student of the Department of Materials Science,

tel.: (057) 707-64-35, e-mail: 3294280@gmail.com,

Subbotina Valeria, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: subbotina.valeri@gmail.com,

Subbotin Oleksandr, Senior Lecturer, Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: subbotin.alex95@gmail.com,

Fedorenko Hanna, eng. I category, Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: ann161169@gmail.com,

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.
