

УДК 641/642: 658.62.018.2

INCREASING THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT IN FOOD PRODUCTION USING TITANIUM AND ITS ALLOYS

I. Oshchypok*Ivan Franko National University of Lviv***Key words:**

titanium,
alloy,
equipment,
food production,
wear resistance

Article history:

Received 09.02.2025

Received in revised form
12.02.2025

Accepted 27.02.2025

Corresponding author:

him1960@ukr.net

ABSTRACT

A comparative analysis of increasing the wear resistance of titanium and its alloys by means of chemical-thermal treatment and application of protective coatings is carried out. Particular attention is paid to the influence of operational factors, in particular, elevated temperatures in contact zones, high speeds and loads in friction pairs, as well as an aggressive chemical environment that causes material degradation. The behavior of titanium and its alloys under corrosion conditions is studied, including a change in the stationary potential, its relationship with the equilibrium potential, the potential of the onset of passivation and complete passivation. The mechanisms of formation of protective oxide and nitride layers and their effect on the durability of parts are evaluated. The main methods of increasing the wear resistance of titanium parts are analyzed, including oxidation, nitriding, spraying and arc coating. Their effectiveness depending on the treatment modes and type of working environment, as well as the interaction of modified surfaces with external loads, which determines the optimal operating conditions of titanium products in food equipment, is considered. Special attention is paid to the mechanism of chemical-thermal treatment (CTP), in particular, boriding, which allows to increase the wear resistance and antifriction properties of titanium. It is established that the considered methods of improving the surface characteristics of titanium parts do not provide a sufficient level of protection under conditions of intensive wear (more than 0.5 mm). These methods have limited prospects for restoring worn parts. Most of them require significant heating of titanium, which complicates the technological process. At the same time, titanium remains a promising material for food equipment due to its corrosion resistance and biocompatibility.

DOI: 10.24263/2225-2916-2025-37-15

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЗАСТОСУВАННЯМ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛАВІВ

І. М. Ощипок, д-р техн. наук, ORCID ID: 0000-0002-5427-3376

Львівський національний університет ім. І. Франка

Проведено порівняльний аналіз підвищення зносостійкості титану та його сплавів за допомогою хіміко-термічної обробки та нанесення захисних покриттів. Розглянуто їхню ефективність залежно від режимів обробки та типу робочого середовища. Особливу увагу приділено механізму хіміко-термічної обробки (ХТО), зокрема боруванню, яке дає змогу підвищити зносостійкість та антифрикційні властивості титану. Встановлено, що розглянуті методи покращення поверхневих характеристик титанових деталей не забезпечують достатнього рівня захисту в умовах інтенсивного зношування (понад 0,5 мм). Ці методи мають обмежені перспективи для відновлення зношених деталей. Рекомендовано застосування захисних покриттів на основі алюмінідів титану.

Ключові слова: титан, сплав, устаткування, харчові виробництва, зносостійкість.

Вступ. З розвитком науки і техніки все більше нових матеріалів впроваджується в сферу обробки та виробництва харчових продуктів, щоб підвищити його ефективність, покращити якість їжі та забезпечити безпеку й гігієну виробничого процесу. Як сучасний високоефективний матеріал титан широко використовується в галузі харчового обладнання завдяки чудовій стійкості до корозії, високих температур і біосумісності [7, 16]. Титан і його сплави знаходять широке використання у багатьох галузях промисловості. Не є винятком і харчове машинобудування. З титану виготовляють варильні котли, бочки, а також казани, в яких готують розсоли, продукти з томатів і соуси. Титан може використовуватися для виготовлення такого обладнання, як різальні машини, млинки, міксери тощо. Крім того, з нього виготовляють деталі холодильників, використання яких надає можливість зменшити витрату холодоагентів і затрати на експлуатацію в умовах підвищеного тиску. Це пов'язано з автентичним комплексом властивостей титану й титанових сплавів: високою міцністю та пластичністю, корозійною стійкістю при малій щільності. На рис. 1 показано переваги використання титану в харчовій промисловості.

Завдяки високій корозійній стійкості і різноманітності харчової сировини обладнання може зберігати високу продуктивність після тривалої експлуатації. У робочих деталях подрібнювальних машин, виготовлених з титанового сплаву, через знос деталей утворюються дрібні сколи або порошок, який не завдає шкоди людському організму при потрапленні в шлунково-кишковий тракт. Крім того, він перетворюється на оксид, наприклад, як TiO_2 , який не тільки нешкідливий для організму людини, але й корисний, оскільки оксид титану є харчовою добавкою [7].

Оксид титану (TiO_2) має кілька корисних властивостей для організму та широко використовується в різних сферах.

Безпечність у харчовій промисловості: використовується як харчовий барвник E171, що надає білий колір продуктам (хоча його безпечність у великих кількостях досліджується); має високу хімічну інертність, що знижує ризик реакцій в організмі.

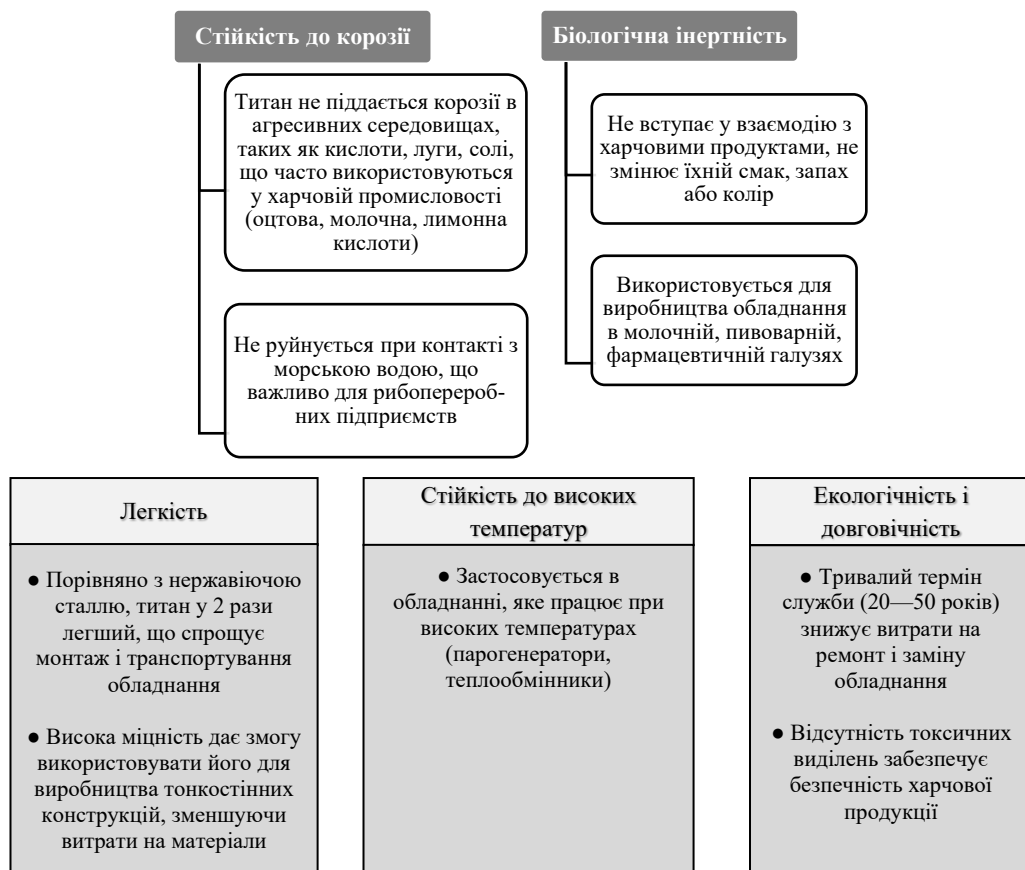


Рис. 1. Переваги використання титану в харчовій промисловості

Антибактеріальні властивості: оксид титану проявляє фотокаталітичні властивості, тобто при впливі світла розщеплює органічні забруднення та бактерії, що сприяє дезінфекції поверхонь; застосовується у фільтрах для очищення води та повітря.

Завдяки цим властивостям оксид титану вважається корисним у біомедицині, косметичі та харчовій промисловості. Однак питання його безпечності у вигляді наночастинок вимагає подальших досліджень.

Упаковка харчових продуктів є важливою ланкою в забезпеченні якості та безпечності харчових продуктів. Титан використовується для виготовлення високоточного обладнання для упаковки харчових продуктів, наприклад, дозувальних, запечатувальних, етикетувальних машин тощо. Його висока стійкість до корозії та високих температур забезпечує стабільність устаткування після тривалої роботи, зберігає значну корозійну стійкість до більшості хімічних речовин, включаючи кислоти, луги, солі тощо, які присутні в харчових продуктах. Харчові машини з титановими деталями мають тривалий термін експлуатації і зберігають хороші механічні властивості, тому титан підходить для обладнання, яке працює в несприятливих умовах під час переробки харчових продуктів.

Стійкість до корозії і нетоксичність титану роблять його ідеальним матеріалом у машинах для перевірки безпечності харчових продуктів, наприклад, створення датчиків для виявлення мікроорганізмів і хімікатів у їжі.

Титан біологічно сумісний з організмом людини, тому його можна використовувати для виготовлення спеціальних пристроїв і контейнерів, які безпосередньо контактують з харчовими продуктами, він не забруднює їжу чи навколишнє середовище.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Вміст домішок (водню, кисню, азоту та вуглецю) має велике значення для механічних властивостей титану, тому ці домішки формують у титані тверді розчини і проміжні фази (гідриди, оксиди, нітриди і карбіди). Наявність невеликого вмісту кисню, азоту, вуглецю підвищують твердість і міцність титану, але при цьому істотно зменшують пластичність і корозійну стійкість, а також погіршують його зварювання [1, 7, 12, 16].

Відомо, що титан існує у двох поліморфних модифікаціях: α -титан з гексагональною щільною упакованою решіткою, яка утворюється при температурах нижче 885 °С, і β -титан з кубічною об'ємноцентрованою решіткою. Відповідно, температура поліморфного перетворення α -титану на β (для йодидного титану) становить 885 °С.

Розрахункова щільність титану характеризується утвореною кристалічною ґраткою, при температурі 25 ± 2 °С становить 4,505 г/см³. Температура плавлення чистого титану становить 1668 °С, а температура кипіння — 3227 °С. Теплопровідність титану високої чистоти при температурі 20...25 °С становить 22,064 Вт/(м·К). Електричний опір титану надто залежить від його чистоти, а значення в різних джерелах подаються від $0,42 \cdot 10^{-6}$ до $0,78 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. При температурах вище –200 °С титан є парамагнетиком.

Титан має високу корозійну стійкість у повітрі при низьких і підвищених температурах. При нагріванні до 600 °С титан покривається оксинітридною плівкою. Через схожість структур металу і плівки остання тримається дуже міцно. Крім того, швидкість дифузії кисню через окислювальну плівку при низьких температурах дуже невелика і добре захищає метал від руйнування. Також титан стійкий у воді, у тому числі морській, і в ґрунтах з різним значенням рН. Але він нестійкий у низці безкисневих мінеральних кислот (фтористоводневої, соляної) за підвищеної концентрації й температури, добре взаємодіє з деякими висококонцентрованими органічними кислотами та лугами при нагріванні (наприклад, 40-відсотковий розчин NaOH за 80 °С). У тих випадках, коли титан кородує, його руйнування йде рівномірно по всій поверхні, а не точковими ділянками, що позитивно його характеризує, на відміну від інших металів. Розчинення азоту та кисню в α -сплавах обмежене, при поглинанні зайвої їх кількості утворюється упорядкована фаза. Механізм поглинання газу залежить від швидкості дифузії в самому металі та оксиді, і він може бути сповільнений чи прискорений за допомогою наявних домішок у них. Активність до кисню у титану вища, ніж до азоту, тож у повітряній атмосфері титан поглинає кисень набагато більше, ніж азот. При температурах до 500 °С швидкість окислення титану й титанових сплавів досить невисока, тому навіть після тривалої витримки механічні властивості, внаслідок поглинання кисню, змінюються несуттєво, коли виріб не тонкостінний і не знаходиться під навантаженням. За високої температури і при значній товщині виробу спостерігається відсутність небезпеки самозаймання, оскільки швидко формується захисний окисний пласт. Окалиностійкість титану може бути підвищена або знижена за рахунок легуючих елементів. Жорсткість йодидного титану залежить від чистоти металу та методу випробувань від 0,5 до 0,88 ГПа та вище. Граничний рівень міцності

металу високої чистоти — 196...294 МПа. З підвищенням температури граничний рівень міцності зменшується — з 235 МПа при 20 °С до 137 МПа при 200 °С, зі зниженням температури до кімнатної — підвищується. Відносне видовження δ залежить від способу обробки титану та може становити від 40 до 82%, а відносне звуження ψ — від 60 до 89%. Наявність малих кількостей домішок у титані технічної чистоти значно підвищує його міцність і зменшує пластичність. Межа міцності титану підвищується до 529...627 МПа при видовженні на 25...30% [13, 14, 15, 17].

Дослідженнями оксидування титану займалися Н. Dong, Т. Bell, А. Bloyce, Р. Н. Morton, Siva Rama Krishna, Y. L. Brama, Y. Sun та інші. У працях цих авторів досліджувалися різні прийоми оксидування, зокрема термічне, хімічне або електрохімічне оксидування [10, 12, 16].

На сьогодні у промисловості для обробки титану і його сплавів часто застосовують газове азотування. Завдяки високій хімічній інертності, твердості, зносо- та корозійної стійкості нітридного шару газове азотування титану застосовують у харчовому машинобудуванні, хімічній промисловості, медицині [2, 5]. Крім високої зносо- та корозійної міцності, до модифікованих шарів висуваються високі вимоги жароміцності, жаростійкості, опірності від окислення при високих температурах [3, 4].

Для цього необхідно використовувати термодифузійне насичення поверхні бором (борування), у результаті чого на поверхні титану утворюються бориди — TiB і TiB₂. Перевагою цих шарів, порівняно з нітридною обробкою, є також їх більш високі показники жаростійкості, твердості, модуля пружності, зносостійкості, тепло- та електропровідності, жароміцності. Проте головним недоліком борування, порівняно з азотуванням, є температура ведення процесу (для борування — 1100...1500 °С; для азотування — 750...1050 °С). За таких високих температур процесу неприпустимо деградує титанова матриця, що негативно впливає на механічні його властивості, з утворенням товстих боридних шарів високої твердості та крихкості, які схильні до сколювання та відшарування під дією контактних навантажень [5, 6].

Мета дослідження: дослідити методи хіміко-термічної обробки деталей харчового обладнання з нанесеним захисним покриттям з титану та його сплавів, застосування яких обмежене через такі суттєві недоліки:

низька твердість і зносостійкість, що спричиняє налипання титану на інструменти або деталі, які працюють у парі тертя, та призводить до швидкого зношування;

висока хімічна активність при підвищених температурах, зокрема взаємодія з воднем (від 50...70 °С), киснем (від 400...500 °С), а також азотом, СО та СО₂ (від 600...700 °С).

При цьому виникає необхідність покращення зносостійкості деталей і різних конструкцій з матеріалу на основі титану при виготовленні харчового устаткування. Значні вимоги до експлуатації титанових сплавів у харчовому машинобудуванні продиктовані підвищеними температурами у контактних зонах, високими швидкостями тертя, значними механічними навантаженнями і впливом агресивного середовища. Забезпечення ефективності в роботі титанових деталей у харчовому машинобудуванні вимагає розробки сучасних результативних методів нанесення захисних покриттів з оптимальними параметрами товщини та зносостійкості.

Матеріали і методи. Мікроструктурний і дюрOMETричний аналізи, мікрорентгеноспектральний аналіз, випробування на жаростійкість.

Результати досліджень. Для титану властиві два стани: активний і пасивний. Титан і його сплави підпорядковуються загальним закономірностям переходу з активного стану в пасивний та назад. Пасивний стан досягається анодною поляризацією або додаванням окислювачів. Визначимо поведінку титану та його сплавів в умовах корозії величиною стаціонарного потенціалу та його розташуванням стосовно рівноважного потенціалу, потенціалу початку пасивації та потенціалу повної пасивації. Схильність титану до пасивації, як і інших металів і сплавів, може бути охарактеризована значенням граничного потенціалу пасивації, критичною щільністю струму пасивації та значенням критичного фокусування окислювача, при яких титан і його сплави переходять у пасивний стан [12]. На відміну від хрому та нержавіючих сталей, титан у розчинах азотної, хромової кислот та їх сумішей, а також при глибокій анодній поляризації не має схильності до перепасивації. Але у присутності активаторів (Cl⁻, I⁻, F⁻) при глибокій анодній поляризації в ділянці високих потенціалів може спостерігатися явище пробою, пов'язане з порушенням пасивної плівки, що характеризується підвищенням швидкості корозії з підвищенням потенціалу та локалізацією іржею виразкового виду. При підвищенні температури та введенні в розчин активаторів, особливо фтор-йонів, швидкість утворення іржі невинно підвищується навіть у пасивному стані (наприклад, у концентрованій азотній кислоті з додаванням фторводневої). У концентрованій фторводневій кислоті швидкість корозії титану скорочується. Так, при концентрації кислоти 60...70% швидкість корозії у 100 разів нижча, ніж у 40-відсотковому розчині, що пояснюється утворенням на титані плівки з гідридів титану. За таких умов швидкість корозії не залежить від потенціалу, а визначається швидкістю розчинення гідридної плівки за рівнянням $TiH_2 + 2H^+ \rightarrow Ti_2 + 2H_2$, при цьому утворюється гідридно-пасивний стан [11] в її порах. Пориста гідридна плівка швидко досягає поляризації, проте інтенсивність корозії не збільшується. У неокислювальних кислотах швидкість корозії титану залежить від перенапруженні виділення водню, яка на титані зменшується у кислих розчинах.

Головні способи збільшення зносостійкості титанових деталей: оксидування, азотування, напилення, дугові способи нанесення покриттів тощо.

Оксидування — це процес створення на поверхні деталей оксидної плівки в результаті окисно-відновної реакції. Для оксидування характерне нанесення шарів товщиною від 2 до 50 мкм, що часто є недостатнім для деталей, що мають зношування більше 0,5 мм [2—5].

Оксидування титану — цілком вивчений механізм, що підтверджують як дослідницькі роботи, так і нормативні документи з оксидування титанових виробів, які застосовуються на небезпечних виробничих об'єктах. Головними режимами оксидування виступають температура, час процесу та умови охолодження, які визначають товщину оксидного шару.

Термічне оксидування означає витримку деталей при температурах від 600 до 850 °C на час від 1 до 12 год, що негативно впливає на титан через підвищення розміру зерна всієї поверхні. Також можливе короблення деталей через довготривалий термічний цикл.

Хімічне оксидування полягає в обробці поверхні розчинами окиснювачів, розплавами або сухими сумішами. Далі між нанесеними елементами і поверхнею здійснюється окислювальна реакція за визначених умов. При хімічному оксидуванні важливим специфічним процесом є підготовка поверхні, яка включає шліфування і полірування.

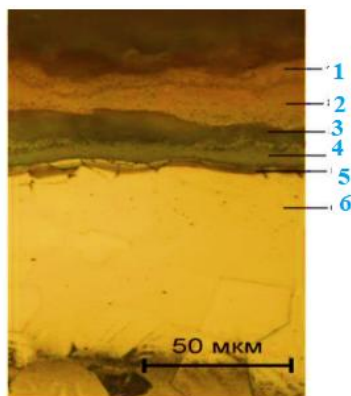


Рис. 2. Мікроструктура поверхневого шару сплаву VT5 після окисдуванням при температурі 850 °С: 1 — зовнішній шар, збагачений оксидом алюмінію Al_2O_3 ; 2 — внутрішній шар, що складається переважно з TiO_2 ; 3 — внутрішній шар, у складі якого переважають оксиди титану TiO або TiO_2 нестехіометричного складу (наприклад $\text{TiO}_{1.9}$), які при пробопідготовці викришувались через підвищену крихкість; 4 — шар на межі з металом, у складі якого присутні інтерметаліди легуючих елементів, витіснених з оксидного шару дифундуючим киснем; 5 — шар важковизначеної природи; 6 — дифузійна зона, насичена киснем [14]

Відомі способи окисдування мають тривалий процес підготовки поверхні, що істотно збільшує час технологічного процесу. При поганій підготовці поверхні виникають типові дефекти у вигляді нещільної плівки або місця зі світлими плямами на поверхні, які вказують на відсутність плівки в цьому місці. Крім того, якщо деталь є складною за конструкцією з наявністю глухих отворів або щілин і порожнин, то можуть утворюватися вади у цих місцях чи навколо них. Не варто забувати про шкідливий вплив пари і хімічних елементів на організм людини при хімічному окисдуванні, що вимагає додаткового захисту оператора.

Електрохімічне окисдування або анодуванням полягає у витримці в електролізній ванні з хімічним розчином, у яку подається серія електричних імпульсів. Процес електрохімічного окисдування відбувається при використанні меншої кількості хімічних розчинів і за нижчих температур, ніж при термічному чи хімічному окисдуванні. Але для цього процесу потрібне більш складне і дорогівартісне обладнання. Цим способом створюються покриття малої товщини.

Азотування є ще одним способом збільшення поверхневих властивостей титанових виробів. Суть азотування полягає в хіміко-термічній обробці деталей, при якій поверхню насичують азотом. Товщина шару при азотуванні варіюється від 10 до 150 мкм.

Найбільшого поширення в промисловості набуло газове та ванне азотування. При азотуванні в соляних ваннах деталь нагрівається до 500—650 °С, а при газовому азотуванні деталь нагрівається від 400 до 800 °С [6, 7, 10], що є небажаним для титанових деталей через підвищення розміру зерна під час нагрівання деталі. Головні недоліки азотування такі: тривалість процесу насичення деталі (до 100 год), висока крихкість поверхневого шару, знижена в'язкість азотованих деталей, нестабільність азотування при застосуванні в машинах харчових виробництв.

Борування — це ще один механізм хіміко-термічної обробки (ХТО), яким підвищують зносостійкість та антифрикційні властивості титану. Суть борування полягає

в дифузійному насиченні поверхневого шару титану при нагріванні і витримці в хімічно активному середовищі.

Дослідження показали, що азотування при температурі 750 °С формує тонку одnofазну поверхневу плівку, представлену нітридом нижчої валентності Ti_2N , тоді як борування при цій температурі не спричиняє змін у фазовій структурі поверхні. З підвищенням температури хіміко-термічної обробки після азотування структура плівки змінюється з одnofазної (Ti_2N) на двофазну (Ti_2N+TiN), а після борування на поверхні утворюється одnofазна плівка, представлена моноборидом TiB .

У промисловості найбільшого поширення набули борування в порошкових сумішах, йонне борування, електролізне борування, рідинне борування, борування з обмазок (паст) та газове борування. Стосовно титану використовують борування в порошкових сумішах і електролізне борування (у ванні з розплавом бору). Борування титану також означає нагрівання матеріалу до 1000...1200 °С від 3 до 8 год, при цьому одержують шари завтовшки до 60 мкм. Борування допомагає збільшити зносостійкість деталей харчопереробних машин з титану і його сплавів у 2 рази. Незважаючи на збільшення зносостійкості отриманих виробів, вони зазнають локального термічного впливу, що зменшує показники механічних властивостей. Ще одним значним недоліком є мала товщина шару, що наноситься, який є недостатнім для деталей, що мають знос більше 0,5 мм.

Мікросистема титану Grade 2 у вихідному стані характерна для сплавів (рис. 3, а). Система представлена поліедричними зернами α -фази, розмір яких становить $\sim 20 \mu m$ і не перевищує $50 \mu m$. Ця дрібнодисперсна структура утворюється через пластичну деформацію в температурній зоні перебування α -фази та подальшого рекристалізуючого відпалу за 600...800 °С.

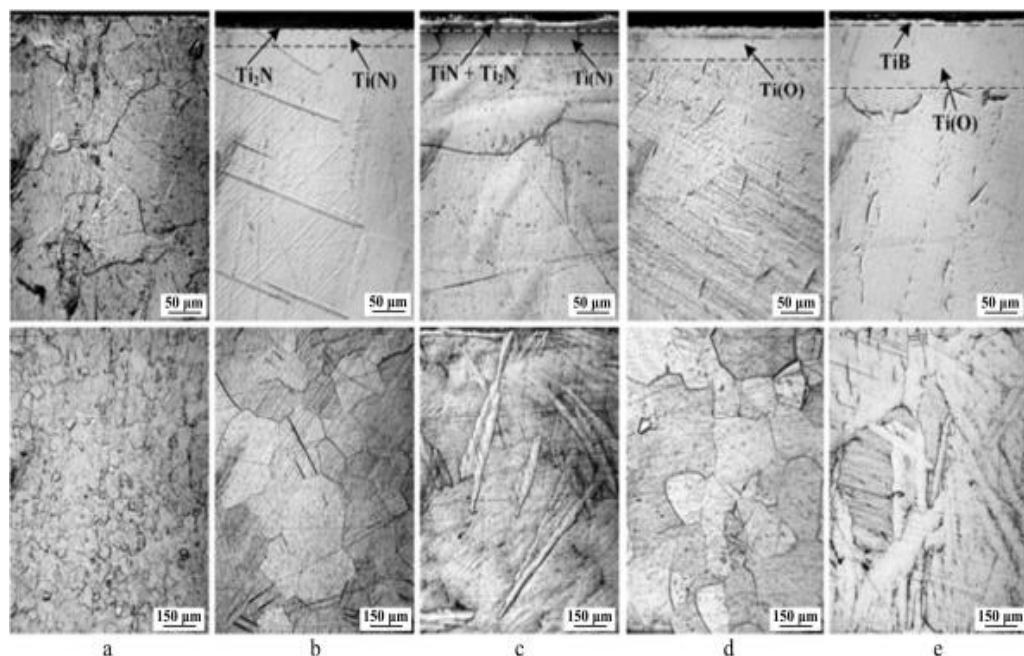


Рис. 3. Мікроструктура титану Grade 2: у вихідному стані (а) та після наступного азотування (b, c) або борування (d, e) за температури 750 °С (b, d) і 900 °С (c, e) [18]

Після хіміко-термічної обробки укріплений градієнтний шар виявляється структурно меншими за α -зерна з пониженим ступенем розтравлювання (альфований шар) (рис. 3, b—e). Товщина нітридної плівки, отримана після азотування при температурі 750 °C, має $\sim 3...4\ \mu\text{m}$ (рис. 3, b). У результаті розчинення азоту в титановій матриці утворюється газонасичена зона — твердий розчин азоту в α -титані, розмір якого становить $\sim 26\ \mu\text{m}$, що корелює з результатами, які отримані відповідно до аналізу зміни градієнта мікротвердості поверхневого шару. Збільшення температури азотування до 900 °C потовщує азотований шар: товщина нітридної плівки становить $\sim 5...7\ \mu\text{m}$ (рис. 3, c), а альфованого шару — $\sim 50\ \mu\text{m}$. Витримка за температури 900 °C і повільне охолодження зумовлюють розвиток α -фази у вигляді одиничних пластин [18].

Встановлено, що досліджені режими азотування значно підвищують корозійну стійкість титану Grade 2 у 20-відсотковому розчині хлоридної кислоти. Водночас боровані зразки демонструють знижену корозійну стійкість у 20-відсотковому розчині HCl.

Дослідження способів збільшення поверхневих властивостей титанових деталей підтвердило, що азотування, оксидування та борування не завжди забезпечують створення захисних покриттів на титанових деталях, які працюють в умовах зношування та мають значний знос (понад 0,5 мм). Крім того, ці способи мають слабкі перспективи до відновлення деталей після зношування. Майже всі з перелічених способів передбачають суттєве нагрівання титану, що спричиняє значне зростання зерна та зменшення міцнісних властивостей, а період механізмів формування оксидних або нітридних шарів збільшує технологічний процес, який не виключає наявність недоліків при неякісній підготовці поверхонь.

Для підвищення ефективності використання титанових сплавів доцільним є застосування захисних покриттів на основі алюмінідів титану. Ключові властивості, які покращуються завдяки алюмінідуванню: зносостійкість — підвищення стійкості деталей до тертя та механічного зношування; корозійна стійкість — захист від впливу агресивних середовищ; жаростійкість — збереження механічних властивостей при високих температурах.

Основні вимоги до покриттів на базі алюмінідів титану:

1. Товщина шару — повинна бути оптимальною для забезпечення довговічності.
2. Міцність зчеплення — покриття має добре зв'язуватися з основним матеріалом.
3. Однорідність хімічного складу — рівномірний розподіл елементів у структурі покриття.
4. Конструкційна міцність — здатність витримувати механічні навантаження.
5. Можливість легування та модифікування — покращення властивостей шляхом введення додаткових елементів.

Отримане покриття має важливе значення з огляду на фінансові витрати на обслуговування та ремонт обладнання. Близько 80...90% деталей підлягають відновленню, що суттєво знижує витрати. Вартість відновлення становить 15...30% від ціни нової деталі, що робить його економічно вигідним рішенням.

На основі експериментальних даних і теоретичного аналізу встановлено, що застосування титанових сплавів сприятиме підвищенню якості продукції. Сплави мають високу корозійну стійкість, що запобігає потраплянню металевих іржавих частинок у харчові продукти. Відсутність токсичних домішок і біосумісність титану забезпечує збереження смакових і хімічних властивостей продуктів. Гладка поверхня

титанових деталей зменшує адгезію бактерій, що покращує санітарні умови. При цьому знижуються експлуатаційні витрати.

Висновок. Титан і його сплави широко застосовуються в обладнанні харчових виробництв завдяки своїм унікальним властивостям: високій корозійній стійкості, міцності, легкості та біологічній інертності.

Титан має низьку щільність і високу міцність, що дає змогу зменшити масу конструкцій без втрати механічних характеристик. Завдяки стійкості до хімічного впливу не вимагає частого ремонту чи заміни деталей, що знижує витрати на технічне обслуговування. Висока теплопровідність деяких титанових сплавів сприяє ефективному теплообміну, що зменшує енергоспоживання, а також збільшує термін служби обладнання.

Стійкість титану до високих температур і механічних навантажень забезпечує тривалу експлуатацію без деформацій. Титанові покриття та хіміко-термічна обробка підвищують зносостійкість деталей, що особливо важливо для рухомих і тертьових вузлів. Завдяки високій механічній міцності титанові компоненти мають тривалий ресурс роботи, що зменшує потребу в частій заміні обладнання.

З розвитком науки й техніки та безперервним удосконаленням обладнання харчової промисловості можна очікувати, що застосування титану в харчових машинах буде розширюватися, сприяючи підвищенню безпеки харчових продуктів і ефективності виробництва.

Використання алюмініду титану може підвищити ефективність використання титанового сплаву. Основними перевагами, які можна збільшити за допомогою алюмінідуванню титану, є довговічність, корозійна та теплова стійкість.

Застосування титану в харчовій промисловості виправдане його унікальними властивостями: довговічністю, безпечністю, стійкістю до корозії та агресивних середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кондращенко, О. В. (2005). *Корозія і захист матеріалів та конструкцій*. Харків: ХНАМГ.
2. Сопрунок, П. М., Юзевич, В. М. (2005). *Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів*. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ».
3. Сахненко, М. Д., Ведь, М. В., Ярошок, Т. П. (2005). *Основи теорії корозії та захисту металів*. Харків.
4. Куцова, В. З., Носко, О. А., Ковзель, М. А. (2007). *Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали: навчальний посібник*. Дніпропетровськ: НМетАУ.
5. Федірко, В. М., Погрелюк, І. М. (1995). *Азотування титану та його сплавів*. Київ: вид. Наукова думка.
6. Flink, A., Larsson, T., Sjolen, J. et al. (2005). Influence of Si on the microstructure of arc evaporated (Ti, Si)N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability. *Surf. And Coat. Technol.*, 200, 1535—1542.
7. Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering*, 68(1), 948—9639. doi: 10.1016/j.msec.2016.06.020.
8. Buschow, K. H. J., van Engen, P. G. et al. (1983). Magneto-optical properties of metallic ferromagnetic materials. *J. Magn. Mater.*, 38, 1—22.
9. Palm, M., Inden, G., Thomas, N. (1995). The Fe-Al-Ti system. *J. Phase equilib.*, 6(3), 209—222.
10. Dong, H., Bell, T. (2000). Enhanced wear resistance of titanium surfaces by anew thermal oxidation treatment. *Wear*, 238, 131—7.

11. Kara, G., Purcek, G., and Yanar, H. (2017). Improvement of wear behaviour of titanium by boriding. *Industrial lubrication and tribology*, 69, 65—70.
12. Kulka, M., Makuch, N., Dziarski, P., Mikolajczak, D., and Przestacki, D. (2015). Gradient boride layers formed by diffusion carburizing and laser boriding. *Optics and Lasers in Engineering*, 67, 163—175.
13. Leyens, C., and Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.
14. Liu, J., Alfantazi, A., and Asselin, E. (2014). Influence of cupric, ferric, and chloride on the corrosion of titanium in sulfuric acid solutions up to 85 °C. *Corrosion*, 70, 29—37.
15. Martin, P. J., Bendavid, A., Cairney, J. M., Hoffman, M. (2005). Nanocomposite Ti-Si-N, Zr-Si-N, Ti-Al-Si-N, TiAl-V-Si-N thin film coatings deposited by vacuum arc deposition. *Surf. And Coat. Technol.*, 200, 2228—2235.
16. Pohrelyuk, I., and Fedirko, V. (2012). *Titanium Alloys — Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications: Chemico-thermal treatment of titanium alloys — Nitriding* (Chapter 7). Ed.: Akm Nurul Amin. In *Tech.*, 141—174.
17. D. Siva Rama Krishna, Y. L. Brama, Y. Sun. (2007). Thick rutile layer on titanium for tribological applications [Текст]. *Tribology International*, 40, 329—333.
18. https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2018/Chapter_02/167_Lavrys.pdf (дата звернення 08.12.2023).