

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).104-115](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).104-115)**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: markob0@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com*

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу вакуумного азотування алюмінієвих сплавів на властивості дифузійних іонноазотованих шарів

В роботі проведено дослідження впливу технологічних параметрів процесу вакуумного азотування алюмінієвих сплавів на мікроструктуру, хімічний склад, залишкові напруження, мікротвердість та шорсткість дифузійних іонноазотованих шарів. Наведена методика проведення досліджень. Виявлено утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару та утворенню в ньому зміцнювальних фаз на основі AlN, утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями, має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні. Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C, найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу 85%Ni₂ + 15% Ar. При формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{зал} = 280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм, при цьому зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур 480 °C протягом 180 хв.

вакуумне азотування, мікроструктура, хімічний склад, напруження, мікротвердість, шорсткість

А. В. Рутковский, ст. научн. сотр., канд. техн. наук*Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина***С.И. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина*

Исследование влияния технологических параметров процесса вакуумного азотирования алюминиевых сплавов на свойстве диффузионных ионноазотированных слоев

В работе проведено исследование влияния технологических параметров процесса вакуумного азотирования алюминиевых сплавов на микроструктуру, химический состав, остаточные напряжения, микротвердость и шероховатость диффузионных ионноазотированных слоев. Приведена методика проведения исследований. Обнаружено образование равномерного за толщиной и распределением легирующих элементов поверхностного слоя и образованию в нем укрепляющих фаз на основе AlN, образуется поверхностная бездефектная структура с измененными свойствами, имеет место диффузия азота, который влияет на фазовый состав, и в окончательном итоге на микротвердость поверхности. Исследования микроструктуры показали, что с увеличением температуры азотирования увеличивается и толщина нитридного слоя. Оптимальное значение температуры при котором достигается максимальная твердость составляет 480°C, наибольшие значения микротвердости наблюдаются при давлении 50 МПа и составе газа 85%Ni₂ + 15% Ar. При формировании теплозащитных диффузионных ионноазотированных

© А.В. Рутковський, С.І. Маркович, С.С. Михайлюта, 2019

слоев в алюминиевых сплавах возникают напряжения сжатия. Максимальное значение остаточных напряжений $\sigma_{ост} = 280$ МПа наблюдается не на поверхности образца, а на глубине около 7 мкм, при этом с ростом длительности насыщения поверхностного слоя увеличивается значение и остаточных напряжений. Однако, такое повышение проходит в условиях максимальных температур 480° на протяжении 180 мин.

вакуумное азотирование, микроструктура, химический состав, напряжение, микротвердость, шероховатость

Постановка проблеми. Зростання експлуатаційних параметрів двигунів внутрішнього згорання викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів двигуна, особливо деталей циліндро-поршнєвої групи [1]. Застосування для виготовлення поршнів алюмінієвих сплавів обумовлено їх високою питомою міцністю і малою питомою вагою, проте великим недоліком цих матеріалів є низька теплостійкість [2].

Перспективним для поверхневого зміцнення деталей автотракторних двигунів внутрішнього згорання вважається метод іонного азотування (іонно-плазмового азотування). Його сутність полягає у тому, що у розрідженому газовому середовищі, яке містить азот, між катодом (деталлю) та анодом (стінками вакуумної камери) збуджується тліючий розряд. При цьому позитивні іони газу з високою енергією, бомбардуючи поверхню катоду, нагрівають її до температури насичення та дифундують в цю поверхню, формуючи твердий розчин азоту в металі, а при досягненні межі розчинності - нітридні фази. Температура азотування $470-580^\circ\text{C}$, тиск $(1,33-13)10^2$ Па, робоча напруга коливається від 400 до 1000 В [2,3]. Разом з тим актуальною є задача визначення закономірностей впливу технологічних параметрів процесу на властивості дифузійних іонноазотованих шарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню властивостей поверхневих зміцнених шарів присвячена значна кількість робіт. Відомо, що при експлуатації діючі в покритті напруження є алгебраїчною сумою експлуатаційних і залишкових напруг. Ясно, що залишкові напруги розтягання в покритті дуже небезпечні. Поряд з цим можна припустити, що при відсутності самовідшарування, наявність значних залишкових напруг стиску в покритті є бажаним, оскільки стискаючі залишкові напруги зменшують вплив прикладених напруг розтягання. Передбачається, що залишкові напруги стиску в покритті є однією з причин збільшення циклічної міцності [4], а також межі текучості і межі міцності при статичному навантаженні [5] для матеріалів з покриттям, що має стехіометричний склад.

Високий рівень залишкових напруг у іонноазотованих шарах обумовлений розходженням температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття й основи; наявністю захоплених атомів газу; неповним структурним упорядкуванням, а отже значним ступенем дефектності конденсату [4,5]. Величина цих напруг змінюється широкому діапазоні від негативних до позитивних значень. Авторами [6] були визначені залишкові напруження в покритті нітриду бору, що у залежності від співвідношення в складі покриття атомів бору й азоту склали від -5 до -1 ГПа. Залишкові напруження стиску, що визначені для покриттів титан-нітрид вуглецю $\text{Ti}(\text{CM})$ на зразку зі сплаву ніобію мали порядок 2-3 ГПа [7]. У роботі [8] визначені залишкові напруження стиску покриття TiN , що осаджений реактивним розпиленням в умовах відсутності кисню склали 7,8 ГПа. При цьому було показано, що із ростом концентрації кисню в газі стискаючі напруження в плівках $\text{T}_1\text{O}_x\text{N}_v$, падають і стають слабо розтягуючими. Це обумовлено зменшенням параметра решітки, заміщенням атому азоту атомом кисню і утворенням аморфних фаз.

Величина залишкових напружень розтягування в покритті з нітриду титана ($\epsilon - \text{Ti}_2\text{N}$), що не має стехіометричного складу, на підлощі з матеріалу 20X13 складала

800...1200 МПа. Різке зниження (від двох до чотирьох разів) залишкових напружень спостерігалось при введенні титанового підшару [5].

Разом з тим вплив процесу вакуумного азотування на мікроструктуру, хімічний склад, залишкові напруження, мікротвердість та шорсткість алюмінієвих сплавів вивчено недостатньо.

Постановка завдання. Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і їх вплив на властивості дифузійних іонноазотованих шарів. Наявність цієї інформації дозволить підвищити міцність і надійність як самих покриттів, так і деталей з покриттями на стадії їхнього конструювання.

Методика дослідження. Методика растрової електронної мікроскопії та визначення хімічного складу. Мікроструктурні дослідження, а саме наявність та розподіл легуючих елементів по поверхні (ділянка 800x600 мкм), виконувалися з використанням методів растрової електронної мікроскопії і рентгенівського мікроаналізу. Дослідження проводилися на електронному мікроскопі мікроаналізаторі “CamScan-4DV”, системі рентгенівського енергодисперсного аналізу “Link- 860” (Англія), системі мікроаналізу “Oxford Energy 300” і рентгенофлуоресцентному аналізаторі фірми Філіпс за загально прийнятою методикою [9].

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА), фізична сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при попаданні первинного електронного пучка на поверхню зразка, що досліджується.

Методика кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу 2AP-4, що використовується в роботі, базується на використанні еталонів відомого складу. При проведенні кількісного мікроаналізу визначається величина відношення інтенсивностей рентгенівського випромінювання елемента, що досліджується, в зразку і в еталоні.

Методика визначення залишкових напружень. Серед існуючих способів визначення залишкових напружень найбільш простим і доступним є метод визначення величини залишкових напружень по кривизні обробленого прямокутного зразка [10]. Залишкові напруження, $\sigma_{\text{зал}}$ визначають, виходячи з того, що при напилюванні покриття на основу невеликої товщини вони приводять до деформації основи. Перед нанесенням покриття зразок закріплюють у кондукторі, що представляє собою пластину з двома затисками, виконаними у виді гвинтів. Після нанесення покриття затиски знімають. Під дією залишкових напруг зразок деформується у виді дуги окружності. У деформованого зразка заміряють прогин f .

Вимірюючи придбаний у такий спосіб прогин зразка з основного матеріалу, залишкові напруги можна визначити за відомими формулами [11]. Використовуючи рівняння пружної лінії для балки, у роботі [12] була отримана наступна залежність для залишкових напруг:

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2(1-\nu)(H+h)} \frac{f}{h}, \quad (1)$$

де E , ν – модуль пружності першого роду і коефіцієнт Пуассона матеріалу основи відповідно;

a – довжина зразка;

f – стріла прогину;

H, h – товщина основи і покриття відповідно, яка для тонких покриттів $h \ll H$, може бути записана [13]

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2(1-\mu)} \frac{f}{h}, \quad (2)$$

а для лінійного н.с.

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{4EH^3}{3a^2h}. \quad (3)$$

Використання апарату теорії вигину тонких пластин приводить авторів [13] до наступної розрахункової формули

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{EH^3}{6(1-\nu^2)(H+h)hR}, \quad (4)$$

де R – радіус кривизни, придбаний зразком у результаті деформації, викликаної залишковими напруженнями.

При $h \ll H$ і в умовах лінійного н.с., залежність (4) перетворюється у відому формулу Стонея

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{EH^2}{6hR}. \quad (5)$$

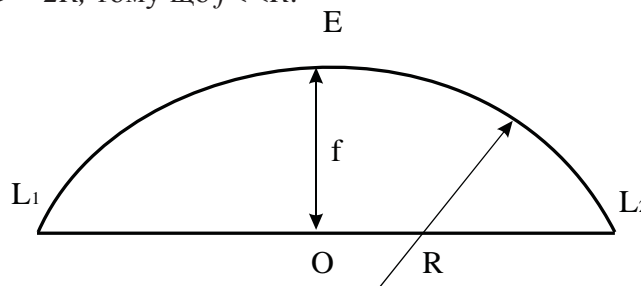
Величину радіуса кривизни R для (5) обчислюють через стрілу сегмента f і хорду l (L_1L_2) (рисунок 1). Грунтуючись на відомостях із планіметрії [13], можна знайти ступінь p точки O . З однієї сторони відомо, що

$$p^2 = OL_1^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2, \quad (6)$$

а з іншої сторони

$$p^2 = EO \cdot Od, \quad (7)$$

де $EO = f$, $OD \approx 2R$, тому що $f \ll R$.



L_1EL_2 – довжина зразка; L_1L_2 – хорда сегменту 1; EO – стріла сегменту, f

Рисунок 1 – Розрахункова схема обчислення радіуса кривизни зразка

Джерело: розроблено авторами з використанням [13]

З врахуванням (7) можна переписати у виді

$$p^2 = f \cdot 2R. \quad (8)$$

Порівнюючи праві частини (6) і (8), одержимо формулу для розрахунку радіуса кривизни R

$$R = \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2 - f^2}{2f}. \quad (9)$$

Таким чином, прямі виміри величини прогину f і наступне використання формул (3), (5) дозволяють визначити величину залишкових напругу в покритті.

Методика дослідження мікротвердості та шорсткості. Дослідження проводилися згідно ГОСТ 9450-76 за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3, кут між протилежачими гранями алмазної пірамідки становив 136° при навантаженні 100 г. При виборі навантаження виходили з імовірної глибини відбитку. Мінімальна товщина шару покриття повинна перевищувати глибину відбитку. Отримані покриття досліджувались на зміну шорсткості поверхні в залежності від технологічних режимів осадження покриттів за допомогою профілографа-профілометра 201 ТО.

Виклад основного матеріалу. Проведено визначення змін в іонноазотованих шарах після процесу їх формування за допомогою мікроструктурного та рентгено-структурного аналізу.

На основі проведених досліджень встановлено рівномірний розподіл та наявність N й Al, а також зміцнювальних фаз на основі з'єднання AlN по поверхні покриттів (рис. 2). Це підтверджує рівномірність охоплення деталі тліючим розрядом, що зумовлює рівномірне бомбардування поверхні деталі іонами газу, рівномірне нагрівання і однакову товщину дифузійного шару по всій поверхні.

Визначення хімічного складу зміцненої поверхні зразків вакуумним азотуванням в пульсуючому пучку плазми проводилося на основі методики кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу ZAF – 4/FLS, за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ - 5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз з урахуванням усіх виправлень, у мікрокомп'ютері системи "Link-860". Дослідження проводилися на ділянці покриття 800 x 600 мкм. При цьому за основний критерій оцінки якості отриманого покриття використовувалися якісні й кількісні значення в поверхневому шарі легуючих елементів (табл. 1).

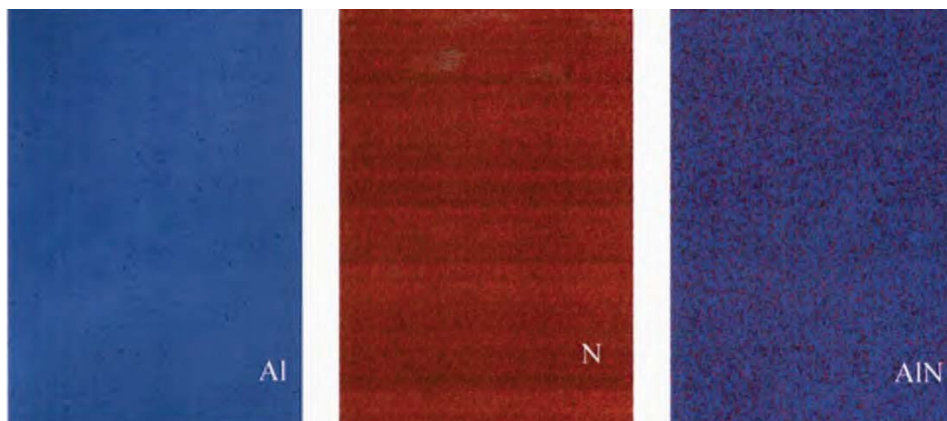


Рисунок 2 – Розподіл хімічних елементів по зміцненій поверхні

Джерело: розроблено авторами

Аналіз хімічного складу покриття дозволяє зробити висновки, що вміст Al знаходиться в межах, достатніх для утворення з'єднання тугоплавкого матеріалу AlN, який може впливати на термомеханічні характеристики покриття.

Таблиця 1 – Хімічний склад вакуум-плазмових шарів

| Вміст хімічних елементів, % | | | |
|-----------------------------|---------|-----------|---------|
| N | Cu | Mg | Al |
| 14...16 | 4,2...6 | 0,8...1.3 | 69...74 |

Джерело: розроблено авторами

Рентгеноструктурні дослідження теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів, що сформовані на підложці з алюмінієвого сплаву АЛ21, проводилась на рентгенівському дифрактометрі ДРОН у фільтрованому мідному Cu-K α випромінюванні з послідовним розрахунком та розшифровкою дифрактограм.

Будова азотованого шару визначається протіканням двої конкуруючих процесів: катодного розпилення й зворотного катодного розпилення, яке залежить від технологічних параметрів іонного азотування. В залежності від характеру протікання цих процесів можна отримати дифузійний шар на базі високо азотистого твердого розчину баз поверхневої нітридної зони і з поверхневою нітридною зоною.

На всіх зразках з покриттями спостерігалися лінії відображення металевого Al, які відносяться до алюмінію підложки. Крім того, в усіх зразках спостерігалися сильні лінії відображення, які відповідають відображенням нітриду алюмінію. Азотування поверхневого шару проходило з участю релаксаційних процесів та утворенням високої щільності дислокацій. Спостерігається текстурування нітридних шарів за площиною куба. На жаль, більшість ліній відображення AlNi накладаються на лінії відображення Al. Для характеристики нанесених покриттів - їх відносної товщини та складу слідували за інтенсивністю та положенням цієї лінії відображення. На всіх рентгенограмах спостерігається лінія відображення під кутом $\psi = 19,7^\circ$, яка відповідає самій сильній лінії гексагонального нітриду алюмінію.

Підсумовуючи слід сказати, що в результаті мікроструктурних та рентгеноструктурних досліджень виявлено:

- утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару;
- утворенню в поверхневому шарі зміцнювальних фаз на основі AlN.

Дослідження мікротвердості та шорсткості поверхні зміцненого зразка. Одним з основних критеріїв впливу технологічного процесу вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми на зразки з алюмінієвого сплаву є зміна мікротвердості системи «основа-покриття» у порівнянні з початковою.

Для дослідження мікротвердості використовували плоскі зразки з алюмінієвого сплаву АЛ21, які підлягали обробці згідно матриці планування експерименту.

Результати експериментальних досліджень представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Мікротвердість зміцненого поверхневого шару.

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Мікротвердість, МПа | 15680 | 12680 | 13220 | 13560 | 11860 | 17920 | 10490 | 10950 | 11920 | 9090 | 12860 | 10720 | 12370 | 15820 | 10280 | 9160 |

Джерело: розроблено авторами

Іонна обробка визначає якість зміцненого поверхневого шару й забезпечує необхідний рівень її очистки та термоактивації. Необхідно відзначити, що в даному випадку при обробці основи утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями на зразку.

Має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні. Крім того, у вакуумній камері установки є присутнім невелика кількість кисню, так званий «залишковий вакуум». Поверхня зразка

знаходиться в активованому стані в процесі бомбардування, то природно, вона буде трохи окислятися завдяки наявності в камері кисню, що у свою чергу також впливає на властивості покриттів (рис. 3).

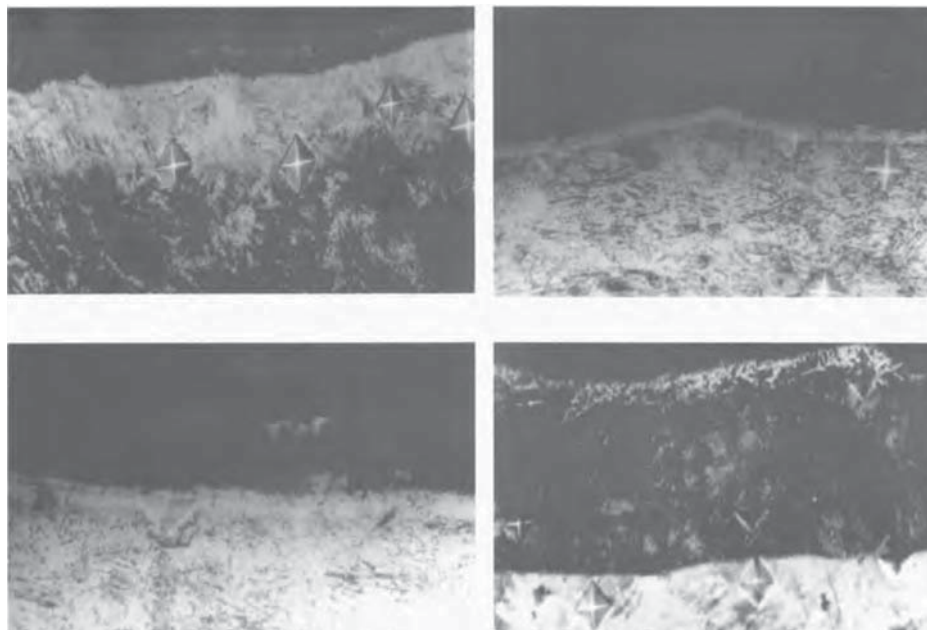


Рисунок 3 – Мікроструктури поперечного шліфа зразка, х 500

Джерело: розроблено авторами

На рис. 4 показані профілі мікротвердості азотованих зразків, що виготовлені із алюмінієвого сплаву. У азотованих зразків спостерігається зростання мікротвердості до $h_n = 20$ мкм, де крива досягає максимуму. При подальшому, збільшенні h_n мікротвердість зразків знижується до твердості основи.

Таким чином, завдяки спеціальній підготовці поверхні та послідуєчій азотації спостерігається підвищення мікротвердості поверхневого шару, властивості покриттів мають високі значення тому, що в їх утворенні беруть участь частинки (іони, збуджені атоми та іони) із високою енергією. Разом із тим формування зміцненого шару на початковій стадії в значній мірі визначає властивості та структуру поверхні в цілому. При подальшій іонній азотації стимулюються дифузійні процеси як за рахунок температури, так і в наслідок імпульсу енергії іонної компоненти.

Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C . Також встановлено, що твердість азотованого шару на гострих кромках вища в порівнянні з її значенням на поверхні без гострих кромки. Це пояснюється більш високою щільністю струму на гострих кромках азотованої поверхні, що сприяє активації дифузійних процесів і підвищення фізико-механічних властивостей. Істотний вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару здійснює тиск та склад реакційного газу. Виявлено, що найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу $85\% \text{Ni}_2 + 15\% \text{Ar}$.

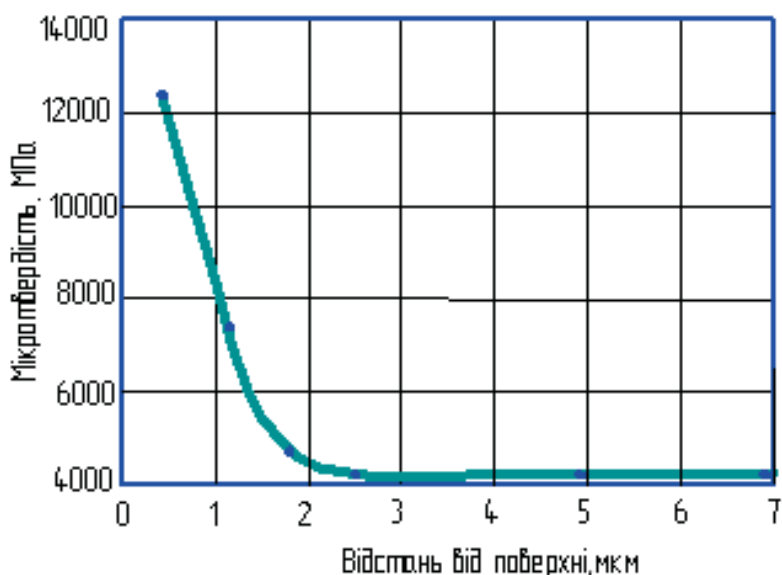


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару зразків
Джерело: розроблено авторами

Якість поверхневого шару поршнів автотракторних двигунів визначається шорсткістю поверхні, фізичним станом поверхневого шару конструкційного матеріалу та його напруженістю. Мікрогеометрія поверхні поршнів, їх рельєф, поряд із фізико-механічними властивостями поверхневого шару, є одним з істотних факторів, що визначають експлуатаційні властивості та працездатність двигунів внутрішнього згорання, їх ресурс та надійність. Крім того, шорсткість поверхневого шару впливає на характеристики міцності, якими є ізотермічна та термоциклічна повзучість.

В результаті аналізу впливу основних технологічних параметрів на формування теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів встановлено, що зміна режимів у процесі їх формування значного впливу на шорсткість поверхні не завдає (табл. 3). Різницю в значеннях шорсткості поверхні можна пояснити наявністю похибки при проведенні досліджень.

Таблиця 3 – Шорсткість поверхні азотованих поверхонь

| № | 0 б.з. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Шорсткість Ra, мкм | 0,48 | 0,45 | 0,49 | 0,50 | 0,46 | 0,52 | 0,47 | 0,51 | 0,59 | 0,52 | 0,55 | 0,50 | 0,55 | 0,53 | 0,48 | 0,47 | 0,46 |

Джерело: розроблено авторами

Залишкові напруження. Для визначення залишкових напружень у зміцненому поверхневому шарі використовували пластинки розміром 200 мм x 15 мм x 1 мм із матеріалу АЛ21. Обробка зразків проводилася згідно матриці планування експерименту.

Перед формуванням дифузійних іонноазотованих шарів зразок закріплювали в кондукторі, який представляє собою пластину з двома затискачами, що виконані у вигляді гвинтів (рис. 5). Після нанесення покриття затискачі були зняті.

Під дією залишкових напружень зразок деформувався у вигляді дуги кола. У деформованого зразка заміряли прогин f , за величиною якого визначали значення залишкових напружень. Досліджувалися також можливості зниження залишкових напружень ще на стадії формування зміцненого шару і управління їх структурою.

Розподіл залишкових напруг $\sigma_{\text{зал}}$ в азотованих зразках приведені на рис. 6, а їх значення подані в табл. 4. У поверхневих шарах зразків, охолоджених після азотації, діють залишкові напруги стиснення на глибині 20...28 мкм. Застосування азотації приводить до утворення в поверхневому шарі матеріалу розподілених по поверхні і перетину залишкових напруг. За величиною стискуючі залишкові напруги більші у тому випадку, коли температура насичення поверхні азотом максимальна. Закономірності зміни залишкових напруг стиснення по перетину поверхневого шару зводяться до того, що їх максимум розташовується в глибині шару, а найбільша протяжність області дії стискуючих залишкових напруг досягається при високих температурах азотизації.

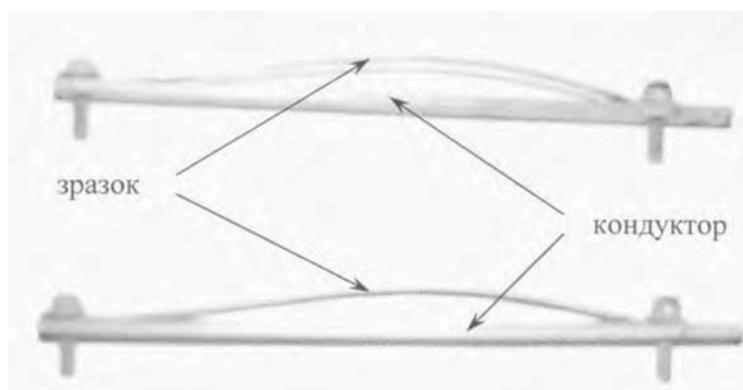


Рисунок 5 – Кондуктор із зразком

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при азотизації регулювання рівня залишкових напруг стиснення і характеру їх розподілу по глибині поверхневого шару повинне здійснюватися шляхом оптимального вибору температури і тиску реакційного газу.

Таблиця 4 – Значення залишкових напружень в залежності від часу азотування

| Вид обробки | Тривалість насичення, хв. | | |
|---|---------------------------|-----|-----|
| | 60 | 180 | 300 |
| Іонне азотування при $T = 480 \text{ }^\circ\text{C}$ | 246 | 280 | 248 |

Джерело: розроблено авторами

Аналіз отриманих результатів показує:

- максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{\text{зал}}=280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм;
- зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур $480 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 180 хв..

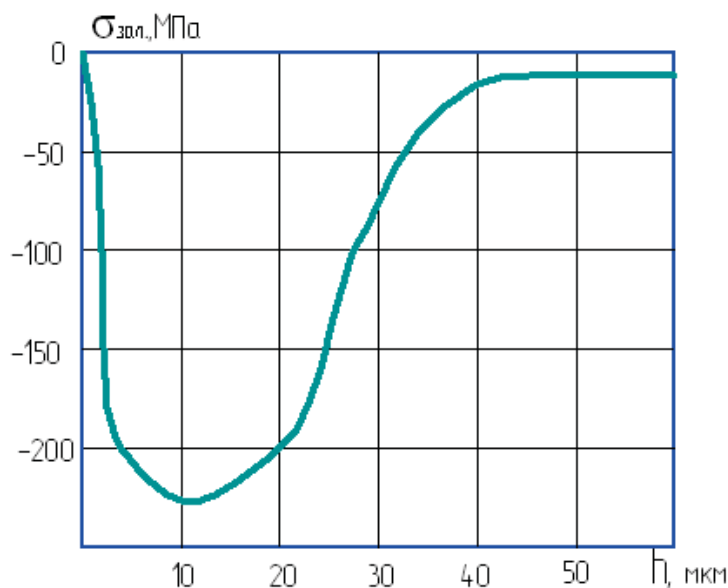


Рисунок 6 – Розподіл залишкових напружень по глибині азотованого шару
Джерело: розроблено авторами

Таким чином, при формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Це може бути пояснено відмінністю температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття й основи, а також значним ступенем дефектності конденсату.

Висновки. Виявлено утворення рівномірного за товщиною та розподілом легуючих елементів поверхневого шару та утворенню в поверхневому шарі зміцнювальних фаз на основі AlN.

Іонна обробка забезпечує необхідний рівень очистки та термоактивації. при цьому утворюється поверхнева бездефектна структура зі зміненими властивостями, має місце дифузія азоту, що впливає на фазовий склад, і в остаточному підсумку на мікротвердість поверхні.

Дослідження мікроструктури показали, що із збільшенням температури азотування збільшується і товщина нітридного шару. Оптимальне значення температури при якому досягається максимальна твердість складає 480°C

Вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару здійснює тиск та склад реакційного газу. Виявлено, що найбільші значення мікротвердості спостерігаються при тиску 50 МПа та складу газу 85%Ni₂ + 15% Ar.

При формуванні теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в алюмінієвих сплавах виникають напруження стиску. Максимальне значення залишкових напружень $\sigma_{\text{зали}}=280$ МПа спостерігається не на поверхні зразка, а на глибині близько 7 мкм, при цьому зі зростанням тривалості насичення поверхневого шару збільшується значення і залишкових напруг. Проте, таке підвищення проходить в умовах максимальних температур 480 ° протягом 180 хв.

Список літератури

1. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания: физические основы технической диагностики и оптимального управления. Минск : Наука і техніка, 1995. 270 с.
2. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного. *Оборудование и инструмент.* 2005. №12. С. 45-47.

3. Ляшенко Б.А., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.
4. Рутковский А.В., Ляшенко Б.А., Гопкало А. П., Сорока Е.Б. Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий. *Пробл. прочности.* 1999. № 6. С. 123-127.
5. Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / под ред. В.И. Гороховского. Киев: Техника, 1992. 141 с.
6. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме / Матвеев Н.В. и др. *Пробл. прочности.* 1985. № 5. С.90-93.
7. Liu Changqing, Jin Zhujing, Wu Weltao Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating. *Acta met. Sci.* 1990. 26, N 1. P.B27-B32.
8. Jin, Ping, Maruno Shigeo Stress relaxation in reactively sputter-deposited TiOxNv films / Jap. J. Appl. Phys. Pf. 1. 1991. 30, N 9A. P.2052-2062.
9. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Зчлин И. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 552 с.
10. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов / под общ. ред. А.Т.Туманова. -т.1. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
11. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. Москва: Наука, 1966. 423 с.
12. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. и др. Москва: Машиностроение, 1989. 576 с.
13. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC. visualNastran for Windows. Москва: ДМК Пресс, 2004. 704 с.

Referencis

1. Grechihin, L.I. (1995). *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: fizicheskie osnovy tehnichejskoj diagnostiki i optimal'nogo upravlenija.* Minsk : Navuka i tjechnika [in Russian].
2. Ljashenko, B.A. & Rutkovskij, A.V. (2005). O dostoinstvah tehnologii vakuumnogo [On the merits of vacuum technology]. *Oborudovanie i instrument – Equipment and tools, 12, 45-47* [in Russian].
3. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhunikiv v pul'suiuchomu puchku plazmy [Development of the Technological Process of Vacuum Nitriding of Engine Pistons in the Pulsating Plasma Beam]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'nodерж. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. – National Interagency Scientific and Technical Collection of Works. Design, Production and Exploitation of Agricultural Machine, Vol. 47, 1, 158-166* [in Ukrainian].
4. Rutkovskij, A.V., Ljashenko, B.A., Gopkalo, A. P. & Soroka, E.B. (1999). Ob uprochnjajushhej roli vakuum-plazmennyh pokrytij [The strengthening role of vacuum-plasma coatings]. *Probl. prochnosti – Strength of Materials, 6, 123-127* [in Russian].
5. Vnukov, Ju.N., Markov, A.A., Lavrova, L.V. & Berdyshev N.Ju. (1992). *Application of wear-resistant coatings on high-speed tools.* (V.I. Gorohovskogo, Trans). Kiev: Tehnika [in Russian].
6. Matveev N.V. i dr (1985). Ostatechnye naprjazhenija v pokrytii iz nitrida titana, osazhdenogo v vakuume [Residual stresses in the coating of titanium nitride deposited in vacuum]. *Probl. prochnosti – Strength of Materials, 5, 90-93* [in Russian].
7. Liu Changqing, Jin Zhujing, Wu Weltao Residual stress and damage mode of hard Ti(CN) coating. *Acta met. Sci.* 1990. 26, N 1. P.B27-B32 [in English].
8. Jin, Ping, Maruno Shigeo Stress relaxation in reactively sputter-deposited TiOxNv films / Jap. J. Appl. Phys. Pf. 1. 1991. 30, N 9A. P.2052-2062 [in English].
9. Gouldstejn, Dzh., N'juberi, D. & Zchlin I. (1984). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis.* (Trans). Moskva: Mir [in Russian].
10. Tumanova, A.T. (Eds.). (1974). *Testing methods, control and research of engineering materials.* Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
11. Vygodskij, M.Ja. (1966). *Spravochnik po zlementarnoj matematike [Elementary Mathematics Reference].* Moskva: Nauka[in Russian].
12. Mjachenkov, V.I., Mal'cev, V.P., Majboroda, V.P. et al. (1989). *Raschety mashinostroitel'nyh konstrukcij metodom konechnih zlementov [Calculations of engineering structures by the finite element method].* Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
13. Shimkovich, D.G. (2004). *Raschet konstrukcij v MSC [Structural Analysis in MSC].* visual Nastran for Windows. Moskva: DMK Press [in Russian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci., Sergiy Myhajlyta, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Research of Influence of Technological Parameters of Process of a Vacuum Nitriding of Aluminium Alloys is on Property of the Diffusive Ion Nitrided Layers

Growth of operating parameters of combustion engines causes the steady increase of working temperature of structural elements of engine, especially pistons. The perspective for the superficial strengthening of details auto of tractor combustion engines is consider the method of the ionic nitriding. At the same time important is a task of determination of conformities to the law of influence of technological parameters of process on property of the diffusive ion nitrided layers.

For the effective analysis of mechanism of the phenomena and technological process control of strengthening of pistons which are made from aluminium alloys, it is necessary to find out intercommunication of factors, which determine motion of process, and their influence on property of the diffusive ion nitrided layers. The presence of this information will allow to promote durability and reliability of both coverages and details with coverages on the stage of their constructing. Research of influence of technological parameters of process of a vacuum nitriding of aluminium alloys is in-process conducted on mikrostructure, chemical composition, remaining tensions, mikrohardness and roughness of the diffusive ion nitrided layers. The method of leadthrough of researches is resulted. Mikro structural researches, namely a presence and distributing of alloying elements is for surfaces, were executed with the use of methods of raster electronic microscopy and x-ray photography mikro to the analysis. The size of remaining tensions was determined on curvature of the treated rectangular standard. Research mikro conducted hardness by a measuring device mikro to hardness of PMT-3, corner between against made 136 degrees the lyings verges of diamond pyramid at loading a 100 gramme. Found out education even after a thickness and distributing of alloying elements of superficial layer and to education in him of strengthening phases on the basis of Aln, a surface structure appears defect-free with the changed properties, diffusion of nitrogen which influences on phase composition takes a place, and in a final result on the mikrohardness of surface. Researches of mikrostructure rotined that with the increase of temperature of nitriding was increased thickness of the nitrided layer.

The optimum value of temperature at which is arrived at maximal hardness makes 480°C, most values mikro observed hardness at pressure of 50 Mpa and will make gas 85%Ni₂ + 15% Ar. At forming of heatcover diffusive іонноазотованих glowed there are tensions of clench in aluminium alloys. The maximal value of remaining tensions of узал=280 Mpa is observed not on-the-spot standard, but on the depth of about 7 мкм, here with growth of duration of satiation of superficial layer increased value and remaining tensions. However, such increase passes in the conditions of maximal temperatures 480 degrees for 180 minutes.**vacuum nitriding, mikrostructure, chemical composition, tension, mikrohardness, roughness**

Одержано (Received) 02.12.2019

Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2019

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019