

УДК 621.785.53

## ШВИДКІСНИЙ МЕТОД НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

К. О. КОСТИК\*, В. О. КОСТИК, А. С. ДОЛЖЕНКО, С. В. НІКІФОРОВА

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, УКРАЇНА  
\*email: eklitus@yandex.ru

**АНОТАЦІЯ** Актуальним є випробування нового азото- та вуглецевмісного середовища для прискорення технологічного процесу ХТО. Метою науково-дослідної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів низькотемпературної нітроцементациї на структуру та властивості легованої сталі. Встановлено оптимальний режим зміцнення поверхневого шару нітроцементациєю, при якому поверхнева твердість становить 9,3 ГПа з загальною глибиною дифузійного шару 0,3 мм. Виявлено, що прискорення дифузії зростає майже в 5–10 разів залежно від температури ХТО при використанні запропонованого нами способу нітроцементациї.

**Ключові слова:** нітроцементация, сталь, глибина дифузійного шару, мікротвердість поверхневого шару

**АННОТАЦИЯ** Актуальным является применение новой азото- и углеродосодержащей среды для ускорения технологического процесса ХТО. Целью научно-исследовательской работы является исследование влияния технологических параметров низкотемпературной нитроцементации на структуру и свойства легированной стали. Установлен оптимальный режим упрочнения поверхностного слоя нитроцементацией, при котором поверхностная твердость составляет 9,3 ГПа с общей глубиной диффузионного слоя 0,3 мм. Выявлено, что ускорение диффузии возрастает почти в 5-10 раз в зависимости от температуры при использовании предложенного нами способа нитроцементации.

**Ключевые слова:** нитроцементация, сталь, глубина диффузионного слоя, микротвердость поверхностного слоя

## HIGH-SPEED METHOD OF CARBONITRIDING OF ALLOY STEEL

K. KOSTYK\*, V. KOSTYK, A. DOLZHENKO, S. NIKIFOROVA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** There is an actual test of the new nitrogen and carbon environment to speed up the process. Traditional processes in salt baths and gas environment with the use of ammonia, natural gas, etc. create a definite type of layer ( $\epsilon$ -nitride). However, they are not able to satisfy the specific requirements for the structure of the layers depending on the conditions of detail and are quite harmful and long processes (50-100 hours). In addition to high temperature carbonitriding in recent years, increasingly began to use low-temperature nutrients when 540-610 the duration from 1 to 8 hours. The purpose of the research is study influence of technological parameters of the low-temperature carbonitriding on the structure and properties of alloy steel. When the temperature of the low-temperature carbonitriding changes from 500 °C to 650 °C during 5 hours in a powder mixture increases the depth of the diffusion layer from 0.14 to 0.43 mm, and the surface hardness decreases from 9.5 to 8.2 GPa. When exposure time increases from 2 to 5 hours at a temperature of 550 °C in the powder mixture, the depth of the diffusion layer increases from 0.137 to 0.24 mm. The optimal mode of hardening of the surface layer nutrients, in which the surface hardness is 9.3 GPa with a total depth of diffusion layer of 0.3 mm. Revealed that the acceleration of diffusion increases almost 5-10 times depending on the temperature when using our proposed carbonitriding method.

**Keywords:** carbonitriding, steel, the depth of the diffusion layer, the microhardness of the surface layer

### Вступ

Хіміко-термічна обробка (ХТО) сталі – сукупність операцій термічної обробки з насиченням поверхні виробу різними елементами (вуглець, азот, алюміній, кремній, хром та ін.) при високих температурах.

Хіміко-термічну обробку широко використовують для зміцнення деталей машин.

Це пояснюється тим, що більшість деталей працюють в умовах зношування, кавітації, циклічних навантажень, корозії при криогенних і високих температурах, при котрих максимальні напруження виникають в поверхневих шарах металу, де зосереджені основні концентратори напруги. Хіміко-термічна обробка, підвищуючи твердість,

зносостійкість, кавітаційну та корозійну стійкість і створюючи на поверхні сприятливі залишкові напруги стискування, збільшує надійність і довговічність деталей машин [1].

В останні роки широко використовують зміцнення деталей шляхом насичення їх поверхонь азотом та вуглецем при відносно низьких температурах (до 600 °С). Така обробка підвищує зносостійкість, втомну міцність і протизадирні властивості як легованої так і вуглецевої сталі, оскільки збільшує твердість поверхні і різко зменшує коефіцієнт тертя.

Низькотемпературна нітроцементация знаходить все більше застосування в індустріально-розвинених країнах витісняючи традиційні методи зміцнення – азотування та цементацию.

При низькотемпературній нітроцементации різко знижується час обробки деталей при їх дуже високій якості. При цьому процесі розміри деталей змінюються незначно, тому слід проводити остаточну термічну обробку а потім вже низькотемпературну нітроцементацию, що сприяє підвищенню продуктивності праці (виключаються тривалі та дорогі операції фінішної обробки зміцнених деталей абразивним інструментом).

Впровадження низькотемпературної нітроцементации в вітчизняну промисловість, при значно невеликих затратах, підвищити довговічність багатьох деталей, підвищити конкурентоспроможність машинобудівної продукції і ліквідувати відставання від зарубіжної практики, широко використовуючи низькотемпературну обробку. Цей процес може бути з успіхом використаний і в ремонті промисловості при відновленні і зміцненні деталей машин [2–3].

Застосування процесу нітроцементации спрямоване на зміцнення різноманітних сталей і сплавів, деталей машин та інструментів, що експлуатуються за різних умов. ХТО має багато технологічних варіантів і вибір того чи іншого процесу визначається технологічністю, можливістю регулювання будови утворюваного шару, швидкістю насичення поверхні, часом підготовчих робіт, рівнем автоматизації, економічністю, дотриманням вимог з охорони праці та навколишнього середовища.

Нітроцементация широко застосовується не тільки для зміцнення різноманітних сталей і сплавів, деталей машин й інструментів, що працюють у різних умовах експлуатації, а і при необхідності підвищення корозійної стійкості металу. Дифузійний шар складається з нітридно-карбідної зони та зони внутрішнього

насичення. Саме нітридно-карбідна зона відповідає за підвищення корозійної стійкості. Це відбувається за рахунок виникнення у поверхневому шарі сталі корозійностійких нітридів і карбідів.

Традиційні процеси – у соляних ваннах й у газовому середовищі зі застосуванням аміаку, природного газу та ін. створюють цілком певний тип шару ( $\epsilon$ -нітриди). Однак вони не в змозі задовольнити конкретні вимоги, пропонувані до будови шарів залежно від умов роботи деталей і є досить шкідливими і тривалими процесами (до 50–100 годин).

### Мета роботи

Актуальним є випробування нового азото- та вуглецевмісного середовища для прискорення технологічного процесу ХТО.

Метою науково-дослідної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів низькотемпературної нітроцементации на структуру та властивості легованої сталі.

### Аналітичний огляд джерел інформації

Під нітроцементацией розуміють вид хіміко-термічної обробки, що складається з дифузійного насичення поверхневого шару сталі одночасно вуглецем і азотом. Цей процес застосовують для підвищення твердості, зносостійкості і межі витривалості поверхневого шару. Нітроцементации піддають деталі з конструкційних низьковуглецевих і середньовуглецевих сталей, а також деталі з нержавіючих сталей і інструмент, виготовлений з швидкорізальних сталей. Нітроцементация може виробляється в рідких, газових і твердих середовищах.

В якості рідких карбюраторів застосовують газ, легке індустріальне масло, піробензол; як газоподібних – природний газ і газ, який використовується для побутових потреб. Недоліком пастоподібних карбюраторів є необхідність використання додаткового вуглецевмісного середовища (газового або твердого), витісняючого повітря з пічного простору і перешкоджаючого вигорянню пасти на зміцнюючихся деталях. Цей недолік ускладнює технологію нітроцементации і підвищує її трудомісткість.

Для забезпечення високої і стабільної якості деталей з урахуванням капітальних витрат, а також кваліфікації працюючих, у вітчизняній практиці ХТО доцільно застосовувати газову цементацию і нітроцементацию з використанням ендотер-

мічної атмосфери. Використовувати рідкі карбюрізатори доцільно тільки в разі відсутності на заводах природного газу, а застосовувати тверду цементацію можна тільки в особливих випадках (відсутнє спеціальне термічне обладнання, одиничне виробництво, ремонтні роботи тощо). Нові методи (і нові атмосфери), вакуумна та іонна ХТО, вимагають високих капітальних витрат і кваліфікації працюючих [4–6].

Для підвищення насичуючої здатності складу і підвищення мікротвердості поверхневого шару деталей використовують ціанування в ваннах при нагріванні струмами високої частоти до 900–950 °С протягом 1–3 хвилини. Постачальниками вуглецю і азоту є меламін, мочевино-формальдегідні смоли, карбамід, полістирол з додаванням щавелевої кислоти та ціанетилендіаміну [7–9]. Але ціанування – дорогий і екологічно дуже шкідливий процес, оскільки солі, що використовуються, містять отруту – ціаністий калій або ціаністий натрій. Тому рідке ціанування сьогодні в промисловості практично не використовується.

На відміну від ціанування, нітроцементация не потребує використання шкідливих солей, значно дешевша, і тому такий спосіб поверхневого зміцнення виробів є найпоширенішим.

Процес здійснюється у суміші газів, що містять вуглець і аміак (80–90 %  $\text{CH}_4$  та 20–10 %  $\text{NH}_3$ ) при температурі 840–860 °С.

З підвищенням температури насичення вуглецем збільшується, а азотом – зменшується. При вказаній температурі поверхневий шар містить ~ 1 % С і 0,5 % N. Слід підкреслити, що незважаючи на нижчу температуру процесу, порівняно з цементацією, швидкість насичення залишається практично такою ж – 0,15 мм/год.

Твердість поверхні після нітроцементации дещо вища, ніж після цементации. Це дозволяє знизити необхідну товщину насиченого шару до 0,6–1 мм. Слід враховувати, що при глибині шару більше 1 мм знижується опір втомі.

Для зміцнення поверхні після нітроцементации деталі піддають гартуванню і низькому відпуску (160–180 °С). Після такої обробки нітроцементований шар має структуру дрібнокристалічного мартенситу і дисперсних карбонітридів [10–11].

Крім високотемпературної нітроцементации в останні роки все ширше стали використовувати низькотемпературну нітроцементацию при 540–610 °С тривалістю

від 1 до 8 годин. Постачальниками азоту і вуглецю виступають мочевино (карбамід), меламін, етаноламіни та ін. речовини в різних співвідношеннях.

### Методика експерименту

Матеріалом для дослідження в даній науково-дослідній роботі є легована сталь 30Г.

Для нітроцементации була застосована суміш, яка складається з азотовмісної речовини та активаторів.

Перед ХТО поверхню досліджуваних зразків очищали від слідів окалини, іржі, змащення й інших забруднень. Потім шліфували й полірували поверхню з наступним знежиренням 96 % спиртом.

Для сталі 30Г гартування робили при  $T = 850$  °С протягом 15 хвилин з охолодженням в воді. Відпуск проводили протягом 1,5 години при температурі 600 °С з охолодженням на спокійному повітрі.

Нітроцементацию зразків здійснювали в камерній печі при температурах 500, 550, 600 та 650 °С протягом 5 годин, а також варіювали витримку нітроцементации протягом 2, 3, 4, 5 годин при температурі 550 °С.

### Вплив температури на формування дифузійного шару сталі 30Г

Чим вище температура процесу, тим товщим виходить дифузійний шар. Однак для отримання високої твердості поверхні процес слід вести при температурах не вище 550 °С. При більш високих температурах спостерігається різке зниження твердості поверхневого шару. При температурах нижче 500 °С також не рекомендується вести процес, так як в цьому випадку сталь насичується азотом в недостатній мірі. З підвищенням температури нітроцементации швидкість дифузії азоту вглиб сильно зростає, знижуючи концентрацію азоту на поверхні. Твердість матеріалу стає нижче, що пояснюється утворенням більш великих нітрідних частинок. Глибина шару стає більшою.

Для сталі 30Г зі збільшенням температури від 500–650 °С глибина дифузійного шару збільшується від 140 до 430 мкм, а глибина нітрідного шару – від 25 до 90 мкм відповідно (рис. 1)

Зі збільшенням температури від 500 °С до 650 °С поверхнева твердість значно знижується (рис. 2).

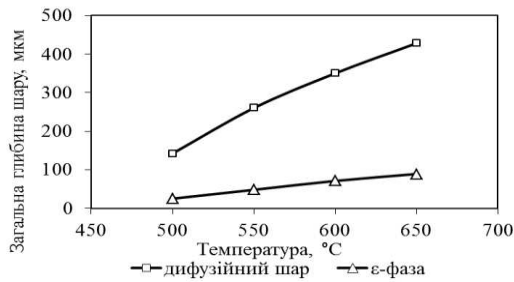


Рис. 1 – Загальна глибина дифузійного шару сталі 30Г залежно від температури нітроцементзації протягом 5 годин

Це пов'язано з активною дифузією азоту вглиб металу. Аналіз цих кривих показує, що твердість дифузійного шару залежить від вмісту вуглецю. Чим більший вміст вуглецю, тим вища твердість за рахунок формування додаткових нітрідів та карбідів.

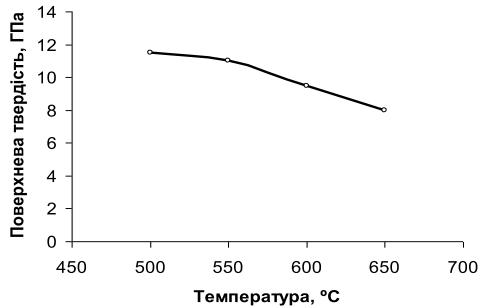


Рис. 2 – Поверхнева твердість сталі 30Г залежно від температури нітроцементзації протягом 5 годин

Теоретично слід враховувати вплив двох факторів на твердість гартованого нітроцементованого шару: адитивного впливу вуглецю та азоту на твердість мартенситу і дії залишкового аустеніту.

У дійсності, адитивну дію вуглецю та азоту на твердість мартенситу є другорядним. У поверхневих областях з високим вмістом вуглецю і азоту переважний вплив на твердість структури має високий вміст залишкового аустеніту.

В областях, віддалених від поверхні, вміст залишкового аустеніту відносно низький і незначно знижує твердість структури. Кількість азоту також невисока в цих областях і твердість мартенситу визначається в основному вмістом вуглецю.

Залишковий аустеніт є головним елементом, що впливає на розподіл твердості в гартованому нітроцементованому шарі. При цьому в нітроцементованому шарі не

досягається твердість вища, ніж у цементованому шарі. Навпаки, в поверхневих областях, багатих залишковим аустенітом, твердість нижче. Це явище є типовим для нітроцементованого шару: найбільша твердість знаходиться не на поверхні, а на певній відстані від поверхні.

На твердість нітроцементованого шару після відпуску певною мірою впливають ще інші елементи. Наскільки відомо, Ренгсторфф встановив, що азот в нітроцементованому шарі впливає на твердість при відпуску.

До цих пір ще не пояснена сутність впливу азоту на твердість відпущеного мартенситу. Можна вважати, що цей вплив пов'язано з більш повільним випаданням перехідною дисперсною формою карбонітрида ε.

Виробничі випробування на дуже навантажених нітроцементованих зубчастих колесах показують, що зниження твердості у поверхневих областях, багатих залишковим аустенітом, не є недоліком, якщо зниження твердості не надто велике. Можна допустити поверхневу твердість до HV 550–600, якщо м'які поверхневі зони розташовані над зонами з твердістю HV 685–700 (HRC 58–59).

Така поверхнева твердість досягається у різних сталях при різному вмісті вуглецю та азоту в нітроцементованому шарі.

Зниження твердості нелегованої сталі при вмісті в поверхневих зонах близько 0,6 % N і близько 1 % C невелике. Інакше йде справа з легованої сталлю, яка в нітроцементованому шарі містить значно велику кількість залишкового аустеніту.

Якщо ж нітроцементовані деталі, з якими проводять гартування з вторинним нагрівом, то при аустенізації на повітрі відбувається поверхневе знеуглення і деазотування. У зв'язку з цим при нітроцементзації з вторинним нагрівом можна допустити більше насичення в залежності від того, як знижується вміст вуглецю та азоту в поверхневих зонах.

Зазвичай вважається допустимим такий кінцевий вміст вуглецю та азоту, що призводить до отримання не більше 50–55 % залишкового аустеніту в поверхневих зонах. Це підтверджується залежністю твердості нітроцементованого шару від вмісту залишкового аустеніту.

Зміна мікротвердості дифузійних шарів сталі після низькотемпературної нітроцементзації протягом 5 годин при різних температурах наведена на рис. 3.

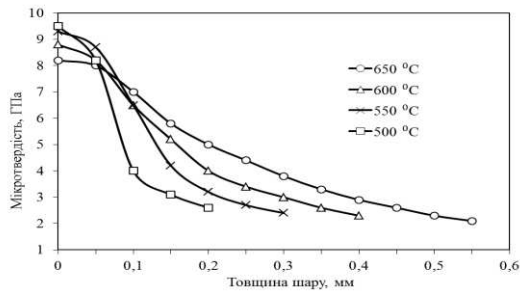


Рис. 3 – Зміна мікротвердості дифузійних шарів сталі 30Г після нітроцементзації протягом 5 годин при 500–650 °С

Для сталі 30Г найбільша твердість відповідає температурі 500 °С, але товщина загального дифузійного шару є недостатньою. При температурі 550 °С товщина шару значно збільшується, поверхнева твердість залишається великою. З підвищенням температури до 600–650 °С значно зростає шар при зниженні твердості. Враховуючи оптимальне співвідношення поверхневої твердості та товщини дифузійних шарів, вибираємо температуру низькотемпературної нітроцементзації 550 °С для сталі 30Г.

Максимальне зміцнення сталі 30Г (до 9,5 ГПа) досягається при низьких температурах (500 °С), коли в процесі насичення в  $\alpha$ -фазі спостерігається утворення окремих нітридів та карбонітридів. При підвищенні температури ХТО до 550 °С твердість поверхневого шару знижується до 9,3 ГПа. Насичення азотом та вуглецем при 600–650 °С, коли частки нітридів укрупнюються, призводить до помітного зниження твердості до 8,2 ГПа сталі 30Г (рис. 3).

Перепад твердості тим більше, чим нижче температура нітроцементзації. Чим вище температура нітроцементзації, тим більше глибина дифузійного шару і більш рівномірне падіння твердості по товщині шару (рис. 3).

**Дослідження зміни властивостей сталі 30Г після різної тривалості низькотемпературної нітроцементзації**

Загальна глибина дифузійних шарів залежно від тривалості нітроцементзації приведена на рис. 4. При збільшенні тривалості ХТО від 2 до 5 годин для сталі 30Г дифузійний шар складає від 137 до 240 мкм, а карбонітридний – від 12 до 48 мкм відповідно.

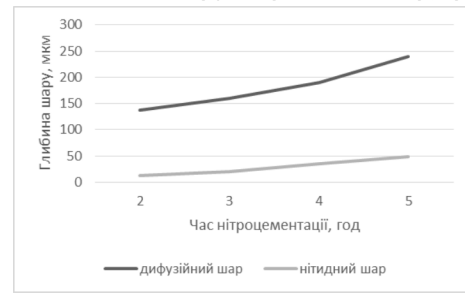


Рис. 4 – Загальна глибина дифузійного шару сталі 30Г залежно від тривалості процесу нітроцементзації при 550 °С

Зміна мікротвердості і глибини дифузійних шарів сталі 30Г після нітроцементзації при температурі 550 °С при різних тривалості процесу наведена на рис. 5. З якого видно, що мікротвердість залишається постійною, а змінюється тільки глибина нітроцементованого шару. Найбільшу поверхневу твердість мають всі зразки (2–4 години витримки), але товщина загального дифузійного шару є недостатньою. При тривалості процесу 5 годин товщина шару значно збільшується, поверхнева твердість залишається великою. Враховуючи оптимальне співвідношення поверхневої твердості та товщини дифузійних шарів, вибираємо тривалість низькотемпературної нітроцементзації 5 годин при 550 °С.

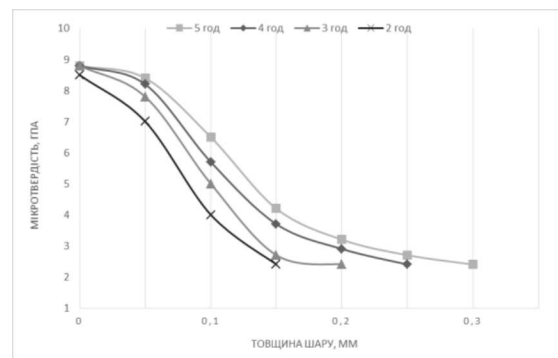


Рис. 5 – Зміна мікротвердості і глибини дифузійних шарів сталі 30Г після нітроцементзації при 550 °С і тривалості процесу 2–5 годин

Проаналізувавши зміну мікротвердості від поверхні до серцевини зразків, виявили що значення мікротвердості є однаковими незалежно від часу низькотемпературної нітроцементзації – 9,3 ГПа на поверхні та 2,4 ГПа – в серцевині після нітроцементзації (рис. 5).

### Коефіцієнт дифузії азоту

Відомо, що для проведення поверхневого дифузійного насичення виробу необхідно створити направлений дифузійний потік атомів насичуючого елементу з поверхні в глибину виробу.

Для визначення коефіцієнта дифузії атомарного азоту користуються другим рівнянням дифузії, що є диференціальним рівнянням другого порядку в частинних похідних і враховує зміну концентрації уздовж напрямку дифузії. Воно встановлює зв'язок між концентрацією, відстанню, на якому відбувається зміна концентрації елемента, що дифундує, і часом, протягом якого спостерігається дифузія, і має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

Це рівняння справедливо в тому випадку, якщо коефіцієнт дифузії  $D$  не залежить від концентрації. Для рішення наближених завдань по дослідженню дифузійних процесів при поверхневому насиченні застосовують друге рівняння Фіка, задаючи певними граничними умовами досвіду.

Математичне рівняння коефіцієнта дифузії азоту в загальному виді можна записати:

$$D_N = D_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

де  $R$  – газова константа, Дж/моль·К,

$D_o$  – коефіцієнт дифузії при нескінченно великій температурі, см<sup>2</sup>/с,

$Q$  – енергія, яку необхідно затратити в процесі дифузії з одного положення рівноваги в кристалічній решітці в інше, кал/г·атом.

Товщина нітроцементованого шару визначається по формулі:

$$h = 2\sqrt{D_N \cdot \tau}, \text{ мкм} \quad (3)$$

З формули 3, знаючи експериментальні дані товщини шару і варіюючи тривалість нагріву, визначаємо коефіцієнт дифузії азоту:

$$D_N = \frac{h^2}{4 \cdot \tau} \quad (4)$$

Залежність експериментальних ефективних коефіцієнтів дифузії азоту для сталі 30Г при різній температурі низькотемпературної нітроцементации показана на рис. 6.

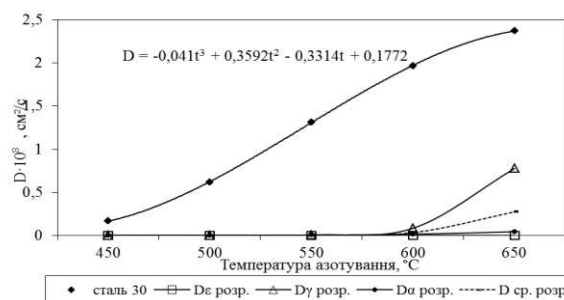


Рис. 6 – Залежність ефективного коефіцієнту дифузії азоту в сталі 30Г від температури низькотемпературної нітроцементации

Як і очікували, з підвищенням температури ефективний коефіцієнт дифузії зростає і змінюється по формулі поліному третього ступеня:

$$D = -0,041t^3 + 0,3592t^2 - 0,3314t + 0,1772$$

З рис. 6 видно, що низькотемпературна нітроцементация в запропонованій нами азотовмісній речовині дозволяє прискорити процес у 4–5 разів, що пояснюється збільшенням коефіцієнту дифузії в 5–10 разів залежно від температури ХТО в порівнянні з теоретичними значеннями  $D_N$  при газовому азотуванні. Це пояснюється двома явищами: по-перше, при використанні азотовмісної речовини значно підвищується кількість активних радикалів азоту, у порівнянні з азотуванням в аміаку – до 50%; по-друге, дисперсний порошок, маючи дуже велику активну поверхню, практично відразу при досягненні заданої температури розкладається з виділенням активного атомарного азоту і вуглецю.

### Висновки

1. При підвищенні температури низькотемпературної нітроцементации від 500 °C до 650 °C протягом 5 годин в порошок суміші збільшується глибина дифузійного шару від 0,14 до 0,43 мм відповідно, а поверхнева твердість зменшується від 9,5 до 8,2 ГПа.

2. При збільшенні часу витримки ХТО від 2 до 5 годин при температурі 550 °C в порошок суміші глибина дифузійного шару збільшується від 0,137 до 0,24 мм.

3. Оптимальним режимом зміцнення поверхневого шару нітроцементацией вважаємо при температурі 550 °C протягом 5 годин в порошок суміші, після проведення якої поверхнева твердість становить 9,3 ГПа з загальною глибиною дифузійного шару ~ 0,3 мм.

4. Прискорення дифузії зростає майже в 5–10 разів залежно від температури ХТО при використанні запропонованого нами способу нітроцементзації. З підвищенням температури ефективний коефіцієнт дифузії зростає і змінюється по формулі поліному третього ступеня.

#### Список литературы

1. **Чаттерджи-Фишер, Р.** Азотирование и карбонитрирование [Текст] / **Р. Чаттерджи-Фишер, Ф.-В. Эйзелл, Р. Гофман и др.**; пер. с нем. В. А. Федоровича; под ред. А. В. Сулова. – М.: *Металлургия*, 1990. – 280 с.
2. **Тарасов, А. Н.** Высокотемпературная нитроцементация и низкотемпературное никотрирование стали 16Х-ВИ для повышения износостойкости [Текст] / **А. Н. Тарасов, А. Г. Нятин, П. Р. Шевченко** // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2007. – № 5. – С. 27–31.
3. **Петрова Л. Г.** Внутреннее азотирование жаропрочных сталей и сплавов [Текст] / **Л. Г. Петрова** // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2001. – № 1. – С. 10–17.
4. **Фунатани, К.** Низкотемпературное азотирование сталей в соляных ваннах [Текст] / **К. Фунатани** // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. – № 7. – С. 12–17.
5. **Айрапетян, Н. А.** Повышение износостойкости конструкционных сталей с помощью низкотемпературного насыщения углеродом и азотом [Текст] / **Н. А. Айрапетян** // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. – № 5. – С. 23–26.
6. **Fernandes, F. A. P.** Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel [Текст] / **F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto et al.** // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2010. – Т. 40(2). – С. 175–179.
7. **Shu-Hung Yeh.** Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel [Текст] / **Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang** // *Engineering, Scientific Research Publishing*. – 2011. – Т. 9(3). – С. 942–948
8. **Ben Slima, S.** Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance [Текст] / **S. Ben Slima** // *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*. – 2012. – Т. 9(3). – С. 640–644
9. **Baranowska, J.** Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding [Текст] / **Jolanta Baranowska** // *Material Science*. – Lithuania, 2005. – Т. 11(3). – С. 226–307.

10. **Fossati, A.** Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time [Текст] / **A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto** [ etc. ] // *Surface and Coat. Technol.* – 2006. – Т. 200(11). – С. 3511–3517.
11. **Liu Junyou.** Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams [Text] / **Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjing** // *Appl. Surface Sci.* – 2005. 252. – № 4. – P. 921–928.

#### References

1. **Chatterdzhi-Fisher, R., Eyzell R., Gofman, F.-V.** Azotirovanie i karbonitirovanie. *Moscow: Metallurgy*, 1990, 280.
2. **Tarasov, A. N., Nyatin, A. G., Shevchenko, P. R.** Vyisokotemperaturnaya nitrotsementatsiya i nizkotemperaturnoe nikotrirovanie stali 16H-VI dlya povysheniya iznosostoykosti. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2007, 5, 27–31.
3. **Petrova L. G.** Vnutrennee azotirovanie zharoprochnykh staley i spлавov. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2001, 1, 10–17.
4. **Funatani, K.** Nizkotemperaturnoe azotirovanie staley v solyanykh vannakh. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, 7, 12–17.
5. **Ayrapetyan, N. A.** Povyishenie iznosostoykosti konstruktivnykh staley s pomoshchyu nizkotemperaturnogo насыsheniya uglerodom i azotom. *Uprochnyayushchie tehnologii i pokryitiya*, 2005, 5, 23–26.
6. **Fernandes, F. A. P., Heck, S. C., Pereira, R. G., A. () Lombardi-Neto,** Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010, 40(2), 175–179.
7. **Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang.** Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel. *Engineering, Scientific Research Publishing*, 2011, 9(3), 942–948.
8. **Ben Slima, S.** Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 2012, 9(3), 640–644.
9. **Baranowska, J.** Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding. *Material Science, Lithuania*, 2005, 11(3), 226–307.
10. **Fossati, A., Borgioli, F., Galvanetto, E.** Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time. *Surface and Coat. Technol*, 2006, 200(11), 3511–3517.
11. **Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjing.** Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams. – *Appl. Surface Sci*, 2005, 4, 921–928.

Надійшла (received) 25.02.2015