

- Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування: Зб. наук. пр. – Луцьк: Луцьк. нац. техн. ун-т., 2013, Вип.4. – С. 45–52.
12. Эйгелес Р. М., Стрекалова Р. В, Мустафина Н. Н. Выбор оптимальных размеров породоразрушающих элементов и их рациональное размещение по поверхности забоя // Разрушение горных пород; под ред. Р. М. Эйгелеса. – М., 1975. – С. 136–149.
 13. Пат. 47724 Україна МПК E21B 10/48. Алмазна бурова коронка / А. Л. Майстренко, І. А. Свешніков, Р. К. Богданов, О. М. Ісонкін, О. П. Виноградова, П. Г. Людвиченко. – Опубл. 25.02.2010; Бюл. № 4.
 14. Пат. 15217 Україна МПК G01B 11/30. Пристрій для дослідження робочої поверхні інструменту / О. П. Виноградова, А. Л. Майстренко, І. А. Свешніков, В. Д. Медведєв, П. Г. Людвиченко. – Опубл. 15.06.2006; Бюл. № 6.

Надійшла 18.06.13

УДК 622.245

В. І. Мірненко, д-р техн. наук, проф.¹, **Б. О. Чернов**, д-р техн. наук, акад. УНГА, проф.²,
О. В. Радько, канд. техн. наук³, **М. Я. Ткач**²

¹Національний університет оборони України ім. Івана Черняховського, м. Київ

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

³Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ МЕТОДОМ ДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ ПРИ ВАКУУМНОМУ ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНОМУ ІОННОМУ АЗОТУВАННІ В ІМПУЛЬСНОМУ РЕЖИМІ

Проаналізовано молекулярно-механічного зношування замкових різьбових з'єднань бурильної колони. Вказано на перспективність використання технологічного процесу зміцнення різьбових з'єднань методом вакуумного газотермоциклічного імпульсного іонного азотування. Запропоновано модель дифузійного насичення поверхні деталі азотом, яка враховує додаткову рушійну силу, обумовлену застосуванням імпульсного газотермоциклічного режиму.

Ключові слова: бурильна колона, різьбове з'єднання, довговічність, зміцнення.

При бурінні нафтових і газових свердловин на бурильну колону діють значні статичне та динамічне навантаження, що часто призводить до ускладнень і аварій через корозійно-втомне руйнування різьбових з'єднань. Під час згвинчування і розгвинчування замкових різьбових з'єднань зі значним крутним моментом зношуються витки різьби, що так само впливає на роботоздатність бурильної колони. При згвинчуванні бурильних труб у різьбовому з'єднанні виникають пружні деформації натягу і контактний тиск у зоні дотику витків різьби [1]. При циклічних згинах замка контактні зони різьби сприймають зусилля взаємозміщення витків. Ці зусилля характеризуються тертям під напруженням, механізм якого включає пластичне вигладжування шорсткості в зоні тертя. При цьому структуроутворювальні зерна металу подрібнюються та розрихлюються із зародженням субмікросазорів і розвитком нових поверхонь, які деформують початкову форму витків, що призводить до зниження щільності натягу різьби. Поява мікротріщин на витках різьби є суттєвим проявом втомної деформації. Ці тріщини виникають не на дні різьбової канавки, як при механічній втомі, а до лінії контакту

вершини витка із зустрічною впадиною. Через особливості геометрії різьби ця контактна лінія розміщується вище дна впадини, та є концентратором напружень і акумулятором структурних дефектів. Розвиваючись у мікро- та макротріщини вони сприяють відділенню від тіла труби різьбового витка і його послідуєного зминання зі зломом і ослабленням щільності натягу різьбового з'єднання у цілому.

Таким чином, збереження і підтримання в процесі експлуатації якості різьби замкових з'єднань є необхідною умовою забезпечення їх нормативного натягу для запобігання зношування.

Перспективним для підвищення довговічності різьбових з'єднань бурильної колони є метод іонного азотування [2]. 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 °С, тиск – $(1,33...13) \cdot 10^2$ Па, робоча напруга – 400–1000 В [3].

Крім цього, одним із способів низькотемпературного іонного азотування є обробка різьбових з'єднань у плазмі тліючого розряду, що горить у середовищі азоту, інколи з додаванням вуглеводню [2], особливо, його удосконалений варіант – вакуумне газотермоциклічне іонне азотування в пульсуючому режимі [3]. При здійсненні даного способу завдяки використанню пульсуючого струму розряду і газотермічних циклів насичення приповерхневих шарів значно скорочується час обробки, витрат електроенергії і реакційних газів, покращуються експлуатаційні характеристики деталей, оскільки через низькі температури і малий час впливу не здійснюється розміщення серцевини виробу.

Аналіз існуючих моделей формування іонноазотованих поверхневих шарів показав, що на сьогоднішній день теоретичні положення процесу характерні двома підходами.

Згідно з першою моделлю, атоми металу у плазмі тліючого розряду сполучуються з азотом, утворюючи при цьому нітриди. Потім на поверхні вони розпадаються (при бомбардуванні її падаючим потоком), поступово перетворюючись із ϵ – фази у γ – фазу. Атомарний азот, що вивільняється при цьому, утворює α – фазу. Отже, азот поступає у поверхню в результаті утворення нітридів [4].

За другою моделлю, головну роль у процесі азотування у тліючому розряді відіграють атомарні іони азоту. Вони експериментально виявлені у прикатодних шарах газового середовища.

Принциповою відмінністю між існуючими підходами є питання щодо первинності утворення у поверхневих шарах металу нітридів або твердого розчину: за першою моделлю спочатку утворюються нітриди, наслідком розпаду яких стає утворення твердого розчину, за другою – надлишкова концентрація азоту у твердому розчині сприяє хімічним перетворенням.

Щодо самих нітридних часток, які утворюються у азотованих сталях, вважається, що в залежності від хімічного складу, дефектів кристалічної будови матриці, температурно-часових параметрів попередньої термічної обробки та режимів азотування, існують три типи цих часток, відмінні за типом структури, розміром, формою взаємодії з кристалічною решіткою.

Перший тип – зародки нітридів, у яких атоми займають ті ж місця, які вони займали у вихідному твердому розчині, тобто атоми азоту займають октаедричні пори ОЦК-гратки матриці, а атоми легуючого елемента заміщують деякі атоми заліза. У початковому кластері, який повенний бути повністю когерентним з матрицею, розчинені атоми заміщення та упровадження розташовуються випадковим чином. Перерозподіл легуючих елементів у цьому випадку супроводжується не перебудовою старої структури, лише спотворенням гратки матриці навколо пластинчастих зон. Це пояснює появу на мікроелектронограмах безперервних дифузійних тяжів вздовж напрямків $\langle 100 \rangle$ гратки матриці.

Другий тип – багаточарові комплекси нітридної фази товщиною 2–5 нм, що мають кристалічну гратку типу NaCl з періодом $a = 0,412$ нм. Через велику різницю міжплощинних відстаней у ОЦК- матриці та нітридної фази утворення такого багаточарового зародку

приводить до порушення когерентності по краях пластин. При цьому когерентність матриці та нітриду по площині <100> ще зберігається.

Третій тип – частки нітридів розмірами 7–10 нм з порушеною когерентністю ґраток нітриду та матриці. Нітриди утворюють скупчення у вигляді тонких пластинчастих виділень, розташованих під невеликим кутом один до одного.

На розмір та щільність розподілу нітридної фази впливають хімічний склад сталі, дефекти кристалічної будови матриці, режими попередньої термічної обробки та азотування. У азотованому шарі низьколегованих теплостійких сталей мартенситного класу частки, що утворюються на дефектах, як правило, є некогерентними до решітки матриці та сприяють закріпленню та збереженню великої щільності дислокацій у матриці.

На розмір нітридних часток впливають природа легуючого елемента та його кількість. Так, у сплаві Fe – 1% (ат.) Cr, проазотованому при 540 °С протягом 35 год., утворюються зародки нітриду хрому, а у сплаві Fe – 4% (ат.) Cr – некогерентні рівновісні частки розміром 4–6 нм. Нікель перешкоджає утворенню по границях зерен у азотованому шарі нітридних та карбідних виділень у вигляді ланцюжків, які спостерігаються у безнікелевих сталях, що сприяє рівномірному їхньому розподілу між об'ємом зерна та границями бувших аустенітних зерен.

Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо застосування методу іонного азотування показав, що постійно відбувається пошук шляхів удосконалення методу.

Автори робіт [5; 6] пропонують вести процес дифузійного насичення азотом у плазмі пульсуючого струму, що забезпечує недопущення переходу тліючого розряду у дуговий (через малу тривалість імпульсів великої напруги) з одночасним збільшенням швидкості процесу.

Застосовують комбінований пульсуючий режим насичення азотом та вуглецем при циклічному нагріванні та охолодженні садки. Теоретично описано кінетику процесу дифузійного насичення сталей в режимі хіміко-термоциклічної обробки за оцінкою енергетичних характеристик (енергії активації та активаційного об'єму) процесу. Показано [5; 7], що застосування термічних циклів при азотуванні, наприклад, титану обумовлює підвищення його міцності при задовільній пластичності.

Проводяться дослідження щодо скорочення часу азотування конструкційних сталей за рахунок формування дифузійних шарів при пульсуючій подачі аміаку (газоциклічне азотування) або газової суміші 50% N – 50% H [8].

На прикладі сталей 40X та 12X18H10T відмічено ефективність процесу іонного азотування у дуговому розряді низького тиску при енергіях іонів порядку сотень електронвольт.

Автор [9] вказує на переваги газотермоциклічного методу регулювання процесу азотування. Технологія обробки при цьому полягає у періодичному чередуванні циклів насичення при проточному азотуванні та розсмоктуванні азотованого шару при максимально можливому зниженні насичуючої здатності атмосфери. Додаткова інтенсифікація процесу відбувається за рахунок його двохстадійності – насичення та розсмоктування газу проходить при різних температурах.

У роботі [10] пропонується формувати зносостійкі нітридні шари за допомогою комбінованого азотування – послідовних газового азотування та азотування у тліючому розряді.

Однак, існуючі зараз підходи щодо застосування методу ІА використовують лише окремі потенційні можливості його інтенсифікації та підвищення ефективності. Зараз залишаються невирішеними питання щодо недостатньо високої швидкості насичення поверхневих шарів металу азотом (через низький робочий тиск газу) та можливості переходу тліючого розряду у дуговий, що може призвести до оплавлення поверхні деталі, яку обробляють.

Як відомо, дифузійні процеси при імпульсних впливах та циклічних змінах параметрів відрізняються від процесів дифузії в стаціонарних умовах. Основною особливістю є створення рушійної сили, що забезпечує деяку додаткову дрейфову швидкість дифузанта, та появу явищ, подібних до електропластичного ефекту Троїцького. Цей аспект не береться до уваги у моделях

дифузійного насичення при хіміко-термічній обробці, що базуються на використанні класичних законів дифузії Фіка. Проте, вклад цих складових може бути досить вагомим.

Процес азотування в тліючому розряді при газотермоциклічному режимі можна розглядати як дифузійний процес з поверхневого джерела з обмеженою кількістю речовини за наявності зовнішньої рушійної сили (пульсуючого тліючого розряду та газотермоциклів). Припустимо, що дифузійний потік легуючого елементу (газу) розповсюджується тільки у напрямку вісі x (дифузія углиб металу «+», деазотування – «-»). Тоді дифузійний процес проникнення газу в метал через границю розподілу між газовою фазою та металевим розчином можна описати диференціальним рівнянням масоперенесення:

$$\left[D(x, T) \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} = \gamma (C_{grain} - C_g),$$

де $C(x, t)$ - абсолютна концентрація газу в точці x у момент часу t ; C_{grain} – концентрація легуючого елементу на поверхні металу; C_g – концентрація легуючого елементу в газовому середовищі; γ – коефіцієнт масоперенесення (який залежить від хімічного складу металевого розчину, хімічної розчинності легуючого елементу та наявності зовнішніх електромагнітних полів).

Введемо параметр X_{max} – максимальна глибина проникнення легуючого елементу в метал за час τ . Її величину визначають експериментальним шляхом. При $x \geq X_{max}$ від поверхні розділу газ-метал в процесі обробки концентрація азоту дорівнює C_0 , що відповідає концентрації до початку процесу обробки.

За наступних граничних умов: $C(x, 0) = C(x, t)|_{x \geq X_{max}} = C_0$; $0 \leq x \leq X_{max}$; $0 \leq t \leq \tau$, аналітична залежність коефіцієнту дифузії від концентрації легуючого елементу може бути виражена співвідношенням:

$$D = D_0 \frac{C_{max}}{C_{max} - C(x, t)},$$

де C_{max} – концентрація насичення; D_0 – значення коефіцієнту дифузії при зменшенні концентрації розчинного елементу до нуля.

Ця залежність показує, що коефіцієнт дифузії при наближенні концентрації дифундуючого елементу до граничного значення його розчинності різко зростає. Концентрація ж дифундуючого елементу на поверхні, у свою чергу, залежить від активності насичуючого середовища, що забезпечує постачання атомів цього елементу на поверхню, швидкості дифузійних процесів, які призводять до переходу цих атомів вглиб металу, складу та структури утворених фаз.

Тліючим розрядом у перші 15–30 хв. створюється приповерхнева дифузійна зона певної глибини з підвищеною концентрацією азоту. Вона має досить високу дефектність структури, що уповільнює проникнення азоту в об'єм металу. За цей час концентрація азоту виходить майже на межу насичення. Якщо на поверхні концентрація азоту досягає величини, необхідної для утворення ϵ - або γ' -нітриду (6–11 та 1,5–5% за масою відповідно), то утворюються саме ці нітриди. Вони зростають з окремих зародків та швидко утворюють суцільний шар, який називають нітридним. Співставляючи коефіцієнти дифузії азоту в ϵ - γ' - та α -фазах, можна зробити висновок, що при 550 °С швидкість дифузії азоту в α -фазі у 60 разів більше ніж у ϵ -фазі і в 25,5 разів γ' -фазі. Після утворення на поверхні шарів ϵ - та γ' -фаз (для випадку газового азотування воно закінчується за 10 хв. при температурі 550 °С) подальше збільшення глибини дифузійного шару контролюється швидкістю дифузії азоту через ϵ - і γ' -фази. При азотуванні протягом 6 годин при температурі 550 °С сумарного товщина цих двох шарів досягає 0,04 мм.

Для створення сприятливих умов для внутрішнього (в металі) перерозподілу азоту та деазотування з тонкого поверхневого шару вглиб металу, контролю концентрації азоту на

межі розподілу газ-метал та, відповідно, ширини дифузійної зони, у процесі дифузійного насичення застосовано циклічне припинення подавання реакційного газу у камеру установки. На першому напівциклі процесу (стадія дифузійного насичення) відбувається азотування при проточному подаванні робочої суміші газів у вакуумну камеру установки. При цьому поверхня деталі насичується азотом з утворенням нітридної зони. Для максимального використання тільки найбільш активних періодів дифузійного процесу, тривалість півциклів насичення та розсмоктування азотованого шару складала 15–30 хв.

Далі, на другому етапі (стадія розсмоктування) подачу робочої суміші газів припиняють. При цьому відбувається її дисоціація, а азотний потенціал падає практично до нуля. Оскільки нітридна зона складається з метастабільних фаз, у яких азот є активним та здатним до дифузії, створюється високий градієнт концентрації на межі нітридної зони та зони внутрішнього азотування. Починається процес вирівнювання концентрацій, при якому дифузія азоту відбувається переважно вглибину деталі (яка підлягає обробці) за рахунок рушійної сили, що забезпечує додаткову дрейфову швидкість дифузанта, тим самим зменшуючи концентрацію азоту у нітридній зоні (відбувається розпад ϵ -фази), що надає можливість для подальшого насичення цієї фази азотом. Процес формування азотованого шару значно прискорюється.

У той же час, коефіцієнт дифузії залежить і від температури T . Цей факт описується законом Ареніуса:

$$D = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

де A – передекспоненційний фактор, що залежить, головним чином, від типу кристалічної решітки абсорбенту; R – газова стала; Q – енергія активації дифузії (теплота розрихлення кристалічної решітки).

Багаточисельні дослідження показали, що всі структурні дефекти – вакансії, границі зерен, зовнішня поверхня, дислокації тощо впливають на дифузійну рухливість атомів. При хіміко-термічній обробці взагалі, і при газотермоциклічному іонному азотуванні в імпульсному режимі зокрема, реалізуються як об'ємна дифузія (у кожному зерні), яка дає основний внесок у дифузійний потік, так і дифузія по границях зерен (зерногранична дифузія).

Дифузія вздовж границь зерен відбувається з більшою швидкістю, ніж в об'ємі зерна. Це пояснюється тим, що висококутові границі незалежно від їх фізичної моделі містять підвищену концентрацію вакансій та порушень періодичності розташування атомів, що збільшує імовірність атомних переходів та зменшує енергію активації дифузії (ця енергія для зернограничної дифузії складає 0,5–0,7 від об'ємної [11]).

На швидкість дифузії по границях зерен значно впливають взаємне розорієнтування зерен та їх величина. Таким чином, чим менше зерно, тим більшою є протяжність границь, і тим швидше відбувається дифузія та, за інших однакових умов, товщина дифузійного шару виявляється більшою.

Цю обставину, а також факт залежності коефіцієнту дифузії від температури враховано при застосуванні термоциклів у процесі іонноазотуючої обробки. Температурний діапазон термоциклів визначено у відповідності з діаграмою залізо – азот. Діаграма має критичні точки, які відокремлюють області з різним фазовим складом. За рахунок підбирання значень температур відбуваються циклічні фазові перетворення – перехід з низькотемпературної області (нижче температури евтектоїдного перетворення – 591 °С), де існує азотистий мартенсит, до області стійкого аустеніту та у зворотньому напрямку. Ці перетворення призводять до зменшення розмірів зерна та збільшення дифузійних переміщень. При цьому одночасно можуть існувати дві та більше фази з різними будовами кристалічних решіток та різними об'ємами. Одночасно збільшується протяжність границь,

отже, відповідно, і активність граничної дифузії. Відомо, що при евтектоїдному перетворенні азотистий мартенсит формується зі збільшенням об'єму. Так само зі збільшенням об'єму відбувається і сам процес азотування, тобто ці два процеси при накладанні додатково ініціюють один одного у термодинамічному сенсі.

Величина рушійної сили у значній мірі визначається напругою, що подається при обробці тліючим розрядом, отже $\langle V \rangle_F$ – дрейфова швидкість значною мірою залежить від різниці потенціалу, тобто від початкової швидкості іонів азоту при «загонці» останніх у метал.

Відомо, що кінетична енергія зарядженої частки (електрону або іону) є прямо пропорційною величині падіння потенціалу, яка припадає на довжину вільного пробігу цієї частки. Експериментальними дослідженнями впливу імпульсів високого струму на плазму тліючого розряду встановлено, що при тривалості імпульсу до декількох мікросекунд газорозрядний проміжок здатний витримувати напругу, яка значно перевищує напругу стаціонарного розряду, ще не призводячи до дугового пробою. Отже, збільшуючи напругу на полюсах установки до 1000–1200 В (замість 300–400 В при іонному азотуванні у постійному струмі), ми значно підвищуємо ступінь аномальності тліючого розряду, збільшуємо енергію позитивних іонів азоту, які бомбардують поверхню деталі-катода. Це збільшує швидкість та глибину дифузійного насичення деталей азотом.

Згідно з 1-м законом Фіка, за наявності рушійної сили (як результату застосування імпульсного газотермоциклічного іонного азотування), потік J дифундуючого елемента містить поправку відповідно додаткового дрейфового вкладу і має вигляд:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} + C_D \langle V \rangle_F,$$

де $C_D \langle V \rangle_F$ - дрейфовий вклад (C_D – концентрація дефектів, $\langle V \rangle_F$ – дрейфова швидкість, зумовлена імпульсами струму, газо- та термоциклами).

Тоді, відповідно до другого закону Фіка, зміна концентрації дифундуючого елемента у часі буде описуватися наступним рівнянням:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \langle V_x \rangle_F \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Для дифузії у напівкінецьне тверде тіло з джерела з обмеженою кількістю речовини розв'язання даного рівняння матиме вигляд:

$$C(x) = \frac{C_{grain} L_N}{2\sqrt{\pi D t}} \exp \left[-\frac{(x - \langle V \rangle_F t)^2}{4 D t} \right],$$

де L_N – товщина нітридної зони; $\langle V \rangle_F \cdot t = x_{ГТЦ}$ – зміна глибини проникнення дифузанта, зумовлена застосуванням імпульсного ГТЦ ІА, яку можна розрахувати за формулою:

$$x_{ГТЦ} = x - \sqrt{\left(\ln \left[\frac{C_{grain} L_N}{2\sqrt{\pi D t}} \right] - \ln C_x \right) 4 D t}.$$

Отже, можна відзначити, що за умов газотермоциклічного іонного азотування в пульсуючому тліючому розряді суттєво посилюється дифузійна рухливість іонів азоту за рахунок підвищення їх кінетичної енергії. Під час розряду поверхня металу розігрівається, що сприяє проникненню іонів азоту в об'єм металу з подальшим перерозподілом та утворенням нових фаз.

Таким чином, удосконалений метод дифузійного насичення металу азотом, на відміну від існуючих, враховує додаткову рушійну силу, обумовлену застосуванням імпульсного газотермоциклічного режиму, що сприяє більш швидкому створенню на поверхні металу шару з граничною концентрацією азоту та підвищеною густиною дефектів і забезпечує додаткову дрейфову швидкість дифузанта.

Проанализировано молекулярно-механический износ замковых резьбовых соединений бурильной колонны. Указано на перспективность использования технологического процесса упрочнения резьбовых соединений методом вакуумного газотермоциклического импульсного ионного азотирования. Предложена модель диффузионного насыщения поверхности детали азотом, которая учитывает дополнительную движущую силу, обусловленную применением импульсного газотермоциклического режима.

Ключевые слова: бурильная колонна, резьбовое соединение, долговечность, упрочнение.

The analysis of the molecular-mechanical wear of locking threaded connections drill string. Indicated on the prospects of the use of the process of hardening of threaded connections by vacuum gasthermocyclic ionic nitriding. The model of the part surface diffusion saturation with nitrogen, which takes into account the additional driving force resulting from the use of pulsed gasthermocyclic regime.

Key words: drill string, fitting, durability, hardening.

Література

1. Чернов Б. О. Методы підвищення робоздатності бурильних і обсадних колон у нафтовій і газових свердловинах: дис. на здобуття наукового ступеня доктора техн. наук: спец. 05.15.10 – Буріння свердловин; ІФНТУНГ. – 1999. – 300 с.
2. Пастух И. М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы // Проблемы трибологии. – 2004. – № 3. – С. 42–55.
3. Азотирование и карбонитрирование: пер. с нем / Чаттерджи-Фишер Р., Эйзел Ф.В., Хоффман Р. и др.; под ред. А. В. Супова. – М.: Металлургия, 1990. – 279 с.
4. Хитько А. В., Калинина Н. В. Масляный ампульный полярный катод-нейтрализатор // Проблемы высокотемпературной техники. – 1998. – С. 31–42.
5. Солунин М. А. Модифицирование поверхности материалов в импульсной плазме тлеющего разряда // Вестник ИГЭУ. – 2001. – № 2. – С. 67–71.
6. Liang W. Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasma nitriding / W. Liang // Applied Surface Science. — 2003. – Vol. 211, № 1–4. – P. 308–314.
7. Забелин С. Ф. Об активации и кинетической теории процессов диффузионного насыщения металлов при химико-термоциклической обработке // Материаловедение. – 2004. – № 7. – С. 17–22.
8. Шашков Д. П. Химико-термическая обработка конструкционных материалов // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 7. – С. 41–42.
9. Белашова И. С. Газотермоциклический метод регулируемых процессов азотирования // Технология машиностроения. – 2004. – № 5. – С. 11–14.
10. Формування зносостійких нітридних шарів при комбінованому азотуванні / І. М. Погрелюк, О. І. Яськів, І. М. Пастух, та ін. // Проблеми трибології. – 2006. – № 4. – С. 113–116.
11. Термическая обработка в машиностроении: справочник / под ред. Лахтина Ю. М. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

Надійшла 19.06.13