

УДК 621.785.53

Канд. техн. наук К. О. Костик

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ МІСЦЕВОГО ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ЗУБЧАТОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО КОЛЕСА ВІДЦЕНТРОВАНОГО ЗМІШУВАЧА

*Розроблено технологію місцевого поверхневого зміцнення зубчатого циліндричного колеса зі сталі 45Л, яка полягає в поєднанні високого відпуску з розробленою технологією низькотемпературної нітроцементації з обмазок. Виявлено, що при підвищенні температури низькотемпературної нітроцементації від 500 °С до 650 °С протягом 5 годин в обмазках з порошкової суміші збільшується глибина дифузійного шару від 0,07 до 0,21 мм відповідно, а поверхнева твердість зменшується від 7,6 до 5,4 ГПа. Встановлено раціональний режим зміцнення поверхневого шару при температурі 550–600 °С протягом 5 годин, після проведення якого поверхнева твердість становить 7,2–6,5 ГПа з загальною глибиною дифузійного шару ~ 0,15 мм. Розроблена технологія дозволяє проводити місцеве зміцнення ділянок деталі під час проведення високого відпуску, завдяки чому відбувається значна економія ресурсів та енергії України.*

**Ключові слова:** *поверхнєве місцеве зміцнення, нітроцементація, обмазки, дифузійний шар.*

### Вступ

Лиття є одним з найбільш поширених способів виробництва заготовок для деталей машин. Приблизно близько 70 % (за масою) заготовок отримують литтям, а в деяких галузях машинобудування, наприклад у верстатобудуванні, 90–95 %. Широке розповсюдження ливарного виробництва пояснюється великими його перевагами порівняно з іншими способами виробництва заготовок (кування, штампування). Литтям можна отримати заготовки практично будь-якої складності з мінімальними припусками на механічну обробку. Це дуже важлива перевага, оскільки скорочення витрат на обробку різанням знижує собівартість виробів і зменшує витрату металу. Крім того, виробництво литих заготовок значно дешевше, ніж, наприклад, виробництво поковок.

На сьогодні вилівки в нашій країні виготовляються на підприємствах майже всіх міністерств і відомств. Найбільша питома вага припадає на галузі машинобудування і металообробки, які є основними виробниками і споживачами литва. Характерною особливістю ливарного виробництва є неможливість створення міжопераційних доробків рідкого металу, формувальних сумішей, форм і стрижнів. Технологічні процеси в ливарному виробництві носять закритий характер, тобто протікають в умовах, що не дозволяють проводити візуальний контроль за їх ходом (плавлення металу, заливання його у форми, охолодження відливаних). Тому отримання якісних відливаних в основному визначається точністю дотримання технології відливання, якістю формувальної суміші, модельного оснащення, режимами охолодження і термічної обробки готових вилівоків.

За останні роки освоєно багато прогресивних технологічних процесів, що підвищують якість, знижують

витрати на виготовлення відливаних, забезпечують захист навколишнього середовища. Освоєно серійне виробництво нового устаткування, зокрема автоматичних ліній виготовлення відливаних у разових формах, автоматичних і напівавтоматичних машин і ліній. Велика увага приділяється створенню теорії конструювання і розробці робочих процесів високопродуктивних і безшумних машин, комплексних автоматичних ліній і агрегатів безперервної дії з високим ступенем надійності.

Але використання сучасних засобів автоматизації потребує досконалого знання конструкції устаткування. Серед найпоширеніших типів змішувачів – змішувачі каткові з вертикальними катками та горизонтальними катками – відцентрові.

Надійність роботи машини та її довговічність в цілому залежить від якості окремих деталей. Зміна традиційних марок сталей деталей ливарного устаткування на леговані не є доцільною з економічної точки зору, тому місцеве зміцнення деталей простими технологіями є актуальним питанням сьогодення.

### Аналітичний огляд джерел інформації

Однією з технологій поверхневого зміцнення є хіміко-термічна обробка, зокрема нітроцементація.

Низькотемпературній нітроцементації при (560–700) °С піддають сталі різноманітного призначення для підвищення їх поверхневої твердості, зносостійкості, межі витривалості і теплостійкості. Зазвичай ця обробка проводиться при температурі (560–580) °С, тому в процесі обробки при такій температурі на сталі утворюється азотований шар, а вуглець просякає на глибину лиш кілька мікрон, де може утворитися тонка карбонітридна зона [1].

Такій обробці піддають швидкорізальну сталь для підвищення стійкості різального інструменту. Процеси

проводять в активних газових, рідких та порошкових сумішах, які забезпечують насичення поверхневих шарів сталі азотом на глибину 0,01–0,025 мм. Нітроцементацию проводять в суміші, яка складається з 65–75 % газу, що містить вуглець і 25–35 % аміаку, тривалість процесу 1–2 години. На деяких підприємствах застосовують газове середовище, яке отримують пропускаючи аміак крізь деревне вугілля, яке нагрівають до температури (850–900) °C або 560 °C (у муфелі) [2].

Треба відмітити, що малоактивні гази, які не використовують для цементації або високотемпературної нітроцементації, цілком придатні для обробки швидкорізальної сталі, тому що основним елементом, який утворює дифузійний шар високої твердості, у цьому випадку, є азот.

Основна функція газу, що містить вуглець, – розвинути аміак, щоб запобігти перенасичення поверхневого шару азотом і появи крихкої нітридної скоринки [3].

Мікроструктура сталі, яку піддали низькотемпературній нітроцементації аналогічно мікроструктурі азотованого шару цієї сталі [4]. Тому далі розглядаємо механізм утворення нітроцементованого шару, як азотованого.

Механізм утворення дифузійного шару полягає у наступному. У стабільній системі Fe-N у рівновазі знаходяться  $\alpha$ - та  $\gamma$ -тверді розчини азоту в залізі та газоподібний азот. Високоазотисті суміші (нітриди) дисоціюють з виділенням азоту. Утворюваний при цьому азот під високим тиском накопичується у дефектних ділянках решітки (дислокаціях, границях зерен тощо) спочатку в атомарному, а потім у молекулярному вигляді. Однак найбільше значення має метастабільна система Fe-N [5].

1)  $\alpha$ -фаза – азотистий ферит з ОЦК-решіткою з періодами (залежно від вмісту азоту) 0,28664–0,28777 нм. Азот займає октаедричні пори у решітці  $\alpha$ -Fe. Розчинність азоту в  $\alpha$ -фазі при евтектоїдній температурі не перевищує 0,11 %. Знижуючись при кімнатній температурі до 0,04 %, азотистий ферит феромагнітний;

2)  $\gamma$ -фаза (азотистий аустеніт) має ГЦК-решітку з неупорядкованим розташуванням атомів азоту в октаедричних порах. Максимальна розчинність азоту в  $\gamma$ -фазі становить 2,8 %. При температурі 590 °C  $\gamma$ -фаза зазнає евтектоїдного розпаду  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$ . За умов значних переохолоджень  $\gamma$ -фаза піддається мартенситному перетворенню зсуву. Азотистий мартенсит ( $\alpha'$ -фаза) є пересиченим розчином азоту  $\alpha$ -Fe і має тетрагональну об'ємноцентровану решітку;

3)  $\gamma'$ -фаза відповідає твердому розчину на базі нітриду  $Fe_4N$ . Зона гомогенності при 590 °C знаходиться у межах 5,30–5,75 % N.  $\gamma'$ -фаза кристалізується в ГЦК-решітці з атомів заліза з упорядкованим розташуванням атомів азоту в центрах елементарних кубів (1/2 1/2 1/2). Періоди решітки з боку заліза  $a = 0,3791$  нм, а з боку азоту  $a = 0,3801$  нм,  $\gamma'$ -фаза феромагнітна;

4)  $\varepsilon$ -фаза – твердий розчин на базі нітриду  $Fe_{2,3}N$  існує в широкому інтервалі концентрацій 4,55–11,0 % N.

Основа її кристалічної будови є щільне гексагональне упакування атомів заліза. Атоми азоту розташовуються в октаедричних порах, що утворюють підрешітку типу графіту. При температурі 650 °C  $\varepsilon$ -фаза піддається евтектоїдному розпаданню на ( $\gamma + \gamma'$ )-фази. Вміст азоту в евтектоїді складає 4,5 %. Ця фаза феромагнітна;

5)  $\xi$ -фаза ( $Fe_2N$ ) має ромбічну решітку з упорядковано розподіленими атомами азоту. Кристалічну структуру  $\xi$ -фази можна розглядати як викривлену модифікацію решітки  $\varepsilon$ -фази (псевдогексагональну). Зона гомогенності  $\xi$ -фази невелика і знаходиться в межах 11,07–11,18 %. Вищий нітрид заліза стійкий у рівновазі з аміаком при температурі до 450 °C. При більш високих температурах в атмосфері аміаку він розпадається навіть при невеликому вмісті водню.

У процесі формування дифузійних шарів необхідно контролювати не тільки стан насичувальної атмосфери, а й умови нагріву матеріалу, що піддається ХТО, до температури нітроцементації [10].

Якщо при нагріванні і в процесі обробки матеріалу значення цього потенціалу тримається вище відношення  $\gamma'/\varepsilon$ , шари будуть складатись з  $\varepsilon$ - і  $\gamma'$ -фаз. Однак, якщо при нітроцементації його значення буде нижчим від указанного відношення, шари, сформовані на сталій підкладці в процесі насичення, будуть складатись лише з однієї  $\gamma'$ -фази [11].

#### Постановка задачі

Зубчате колесо циліндричне – найбільш відповідальна та навантажена деталь відцентрованого змішувача для виготовлення формувальної суміші. Цю деталь виготовляють зі сталі 45Л, яку потім піддають покращенню, що забезпечує твердість 28-32 HRC. Зубчате колесо циліндричне має великі габарити, тому принципово міняти режим зміцнення поверхневого шару є проблематичним. Пропонується ввести невеликі зміни у технологічний процес термічної обробки деталі, а саме під час проведення високого відпуску зміцнювати поверхню колеса з нанодисперсної обмазки, яку можливо наносити місцево. Обмазка дозволить отримати дифузійний шар аналогічний азотованому.

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

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

Тому в роботі доцільне випробування нової азотовмісної нанодисперсної обмазки для вдосконалення технологічного процесу зміцнення зубчастого колеса циліндричного.

Метою науково-дослідної роботи є розробка технології місцевого поверхневого зміцнення зубчастого циліндричного колеса відцентрованого змішувача для виготовлення формувальної суміші. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити вплив температури обробки на формування дифузійного шару;
- виявити раціональний режим місцевого поверхневого зміцнення;
- дослідити зміну ефективного коефіцієнту дифузії азоту в сталі 45Л від температури низькотемпературної нітроцементації.

#### Досліджувані матеріали для технології місцевого поверхневого зміцнення зубчастого циліндричного колеса

Матеріалом для дослідження в цій науково-дослідницькій роботі є сталь 45Л (яка аналогічна сталі 45). Перед зміцненням поверхню досліджуваних зразків очищали від слідів окалини, іржі, змащення й інших забруднень. Незначні забруднення видаляли знежиреним бензином «Калоса». Потім шліфували й полірували поверхню з наступним знежиренням 96 % спиртом. На поверхню зразків наносили обмазку, яка складалася з азото-вуглецевмісної речовини (3 вагові частки), бури  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (2 вагові частки). Ці складові перемішували в сухому стані, потім додавали зв'язувальні компоненти (96 % спирт і розчин клею БФ-2 в ацетоні) до консистенції сметани і перемішували для отримання однорідної маси. Обмазка наносилася на зразки у два або три шари (до 3–4 мм). Після цього зразки просушувалися у шафі при температурі 140 °С протягом 30–40 хв. до повного висихання. Технологію зміцнення можна назвати нітроцементацією з обмазки.

Для сталі 45Л гартування робили при  $T = 850$  °С протягом 15 хвилин з охолодженням у воді. Зміцнення полягало у суміщенні відпуску з нітроцементацією з обмазок. Обробку зразків здійснювали в камерній печі при температурах 500, 550, 600 та 650 °С протягом 5 годин.

Дослідження мікроструктури зразків зі сталі 45Л проводилися методом оптичної мікроскопії. На зразках після хіміко-термічної обробки знімався шар глибиною 1 мм, а потім виготовлялися мікрошліфи, які знаходилися в струбцинах для збереження шару. Розміри досліджених зразків: висота 18 мм, товщина 10 мм, ширина 10 мм.

Вимірювання мікротвердості було проведено на приладі ПМТ-3 при навантаженні 50 і 100 грамів і витримки 15 секунд згідно з ГОСТ 9450-76. Індентором була алмазна піраміда із квадратною підставою правильної чотиригранної форми з кутом при вершині між протилежними гранями рівним 136°.

#### Результати досліджень

Звичайна термічна обробка сталі 45Л полягає в поліпшенні, а саме гартуванні при 850 °С протягом 15 хвилин з охолодженням у воді та відпуску протягом 1,5 години при температурі 600 °С з охолодженням на спокійному повітрі.

Для відповідальних деталей зі складною конфігурацією проводять стабілізувальний відпуск для зняття внутрішніх напружень, що неминуче виникають у виробі при різанні і можуть бути джерелом підвищених деформацій та отримання сорбіту відпуску.

Нітроцементація з обмазок для сталі 45Л показала, що зі збільшенням температури від 500 до 650 °С глибина дифузійного шару збільшується від 70 до 210 мкм, а глибина нітридного шару – від 25 до 90 мкм відповідно (рис. 1).

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

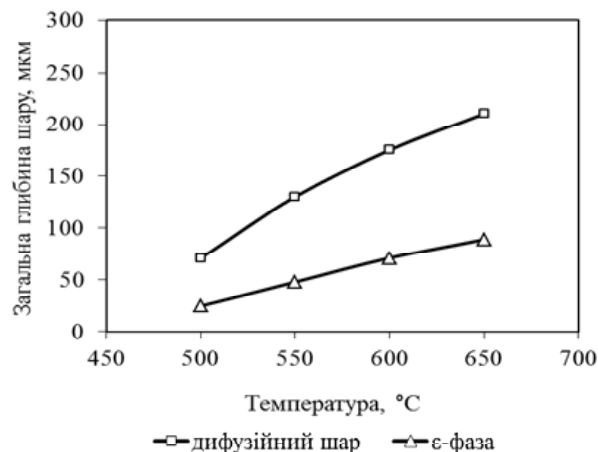


Рис. 1. Загальна глибина дифузійного шару сталі 45Л залежно від температури нітроцементації протягом 5 годин

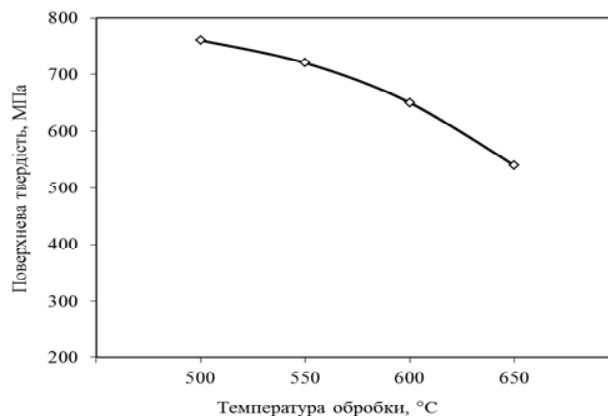


Рис. 2. Поверхнева твердість сталі 45Л залежно від температури нітроцементації протягом 5 годин

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

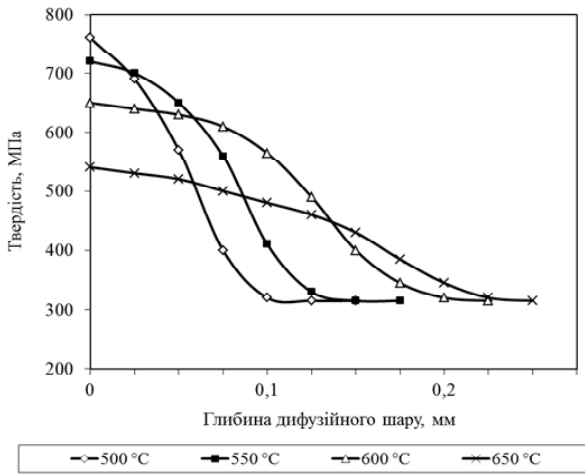


Рис. 3. Зміна мікротвердості дифузійних шарів сталі 30Г після нітроцементації протягом 5 годин при 500–650 °C

Для сталі 45Л найбільша твердість відповідає температурі 500 °C, але товщина загального дифузійного шару є недостатньою. При температурі 550 °C товщина шару значно збільшується, поверхнева твердість залишається відносно великою. З підвищенням температури до 600–650 °C значно зростає шар при зниженні твердості. Враховуючи оптимальне співвідношення поверхневої твердості та товщини дифузійних шарів, вибираємо температуру низькотемпературної нітроцементації 550–600 °C для сталі 45Л.

Максимальне зміцнення сталі 45Л (до 7,6 ГПа) досягається при низьких температурах (500 °C), коли в процесі насичення в α-фазі спостерігається утворення окремих нітридів та карбонітридів. При підвищенні температури ХТО до 550 °C твердість поверхневого шару знижується до 7,2 ГПа. Насичення азотом та вуглецем при 600–650 °C, коли дифузія інтенсивно йде углиб металу, призводить до помітного зниження твердості до 6,5–5,4 ГПа сталі 45Л (див. рис. 3).

Перепад твердості тим більший, чим нижча температура нітроцементації. Чим вища температура нітроцементації, тим більша глибина дифузійного шару і більш рівномірне падіння твердості по товщині шару (див. рис. 3).

Залежність експериментальних ефективних коефіцієнтів дифузії азоту для сталі 45Л при різній температурі низькотемпературної нітроцементації показана на рис. 4.

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

$$D = -0,0234t^3 + 0,1535t^2 - 0,1317t + 0,0717.$$

З рис. 4 видно, що низькотемпературна нітроцементация в запропонованій нами азотовмісній речовині дозволяє прискорити процес, що пояснюється збільшен-

ням коефіцієнта дифузії в 2–3 рази залежно від температури ХТО порівняно з теоретичними значеннями  $D_N$  при газовому азотуванні. Це пояснюється двома явищами: по-перше, при використанні азотовмісної речовини значно підвищується кількість активних радикалів азоту, порівняно з азотуванням в аміаці – 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.

З підвищенням температури крива має більш пологий вигляд, що пов'язано зі збільшенням швидкості дифузії вглиб металу, але обмазка має обмежену кількість насичувальних речовин, тому нема нового потоку атомарних речовин для подальшого формування поверхневих карбо-нітридних шарів.

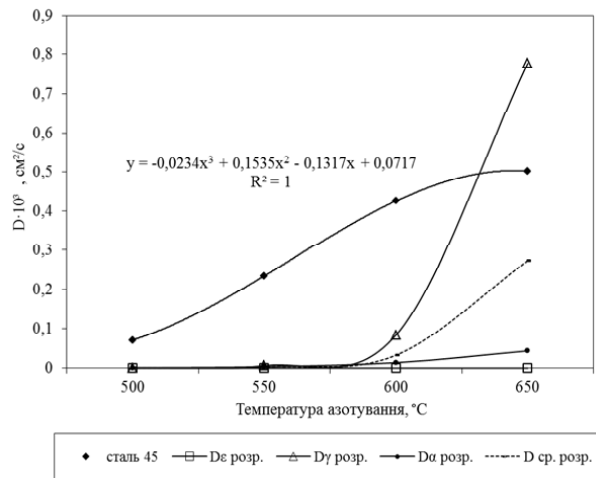


Рис. 4. Залежність ефективного коефіцієнта дифузії азоту в сталі 45Л від температури низькотемпературної нітроцементації

### Висновки

Проаналізувавши отримані дані, можна зробити такі висновки:

1. При підвищенні температури низькотемпературної нітроцементації від 500 °C до 650 °C протягом 5 годин в обмазках з порошкової суміші збільшується глибина дифузійного шару від 0,07 до 0,21 мм відповідно, а поверхнева твердість зменшується від 7,6 до 5,4 ГПа.

2. Рациональним режимом зміцнення поверхневого шару нітроцементациєю вважаємо при температурі 550–600 °C протягом 5 годин, після проведення якої поверхнева твердість становить 7,2–6,5 ГПа з загальною глибиною дифузійного шару ~ 0,15 мм.

3. Доцільно поєднувати високий відпуск зубчастого циліндричного колеса зі сталі 45Л з розробленою технологією низькотемпературної нітроцементації з обмазок.

4. Прискорення дифузії зростає майже в 2–3 рази залежно від температури ХТО при використанні запропонованого нами способу нітроцементації. З підвищенням температури ефективний коефіцієнт дифузії зростає і змінюється за формулою поліному третього ступеня.

5. Розроблена технологія дозволяє проводити місцеве зміцнення ділянок деталі під час проведення високого відпуску.

6. Відбувається значна економія ресурсів та енергії України за рахунок розробленої технології зміцнення зубчастого циліндричного колеса зі сталі 45Л.

#### Список літератури

1. Чаттерджи-Фишер Р. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи-Фишер, Ф.-В. Эйзелл, Р. Гофман и др. ; пер. с нем. В. А. Федоровича; под ред. А. В. Супова. – М. : Металлургия, 1990. – 280 с.
2. Тарасов А. Н. Высокотемпературная нитроцементация и низкотемпературное нитотрирование стали 16Х-ВИ для повышения износостойкости / 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 / Л. Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 1. – С. 10–17.
4. Фунатани К. Низкотемпературное азотирование сталей в соляных ваннах / 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 / 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 / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto and etc. // 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 / 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 / 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 / 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 / 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 / Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjing // Appl. Surface Sci. – 2005. 252. – № 4. – P. 921–928.

Одержано 09.11.2015

#### **Костык Е.А. Разработка технологии местного поверхностного упрочнения зубчатого цилиндрического колеса центробежного смесителя**

*Разработана технология местного поверхностного упрочнения зубчатого цилиндрического колеса из стали 45Л, которая заключается в сочетании высокого отпуска с разработанной технологией низкотемпературной нитроцементации из обмазок. Выявлено, что при повышении температуры низкотемпературной нитроцементации от 500 °С до 650 °С в течение 5 часов в обмазках из порошковой смеси увеличивается глубина диффузионного слоя от 0,07 до 0,21 мм, а поверхностная твердость уменьшается от 7,6 до 5,4 ГПа. Установлен рациональный режим упрочнения поверхностного слоя при температуре 550–600 °С в течение 5 часов, после проведения которого поверхностная твердость составляет 7,2–6,5 ГПа с общей глубиной диффузионного слоя ~0,15 мм. Разработанная технология позволяет проводить местное упрочнение участков детали во время проведения высокого отпуска, благодаря чему происходит значительная экономия ресурсов и энергии Украины.*

**Ключевые слова:** *поверхностное местное упрочнение, нитроцементация, обмазки, диффузионный слой.*

#### **Kostyk K.O. Development of technology for local surface hardening of cylindrical gear wheel of a centrifugal mixer**

*The technology for local surface hardening of toothed cylindrical wheels of steel 45, which is a combination of high-temperature tempering with the developed technology of low-temperature carbonitriding of coatings is developed. It is revealed that with increasing temperature the low-temperature carbonitriding of from 500 °C to 650 °C for 5 hours in the coatings from powder mixtures increased depth of the diffusion layer from 0.07 to 0.21 mm, and the surface hardness decreases from 7.6 to 5.4 GPa. Rational mode of hardening of the surface layer at a temperature of 550–600 °C for 5 hours, after which the surface hardness is 7.2–6.5 GPa total depth of the diffusion layer ~ 0.15 mm is proposed. The developed technology enables a local reinforcement sections detail during the high-temperature tempering, resulting in a significant saving of resources and energy of Ukraine.*

**Key words:** *local surface hardening, carbonitriding, coating, diffusion layer.*