

Міністерство освіти і науки України Національний університет  
кораблебудування імені адмірала Макарова

**МАРТИНЕНКО ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 621.791.927

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ  
НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ЗА  
ДОПОМОГОЮ ДУГИ З НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

Спеціальність 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і  
технології

АВТОРЕФЕРАТ дисертаційної роботи на здобуття наукового  
ступеня кандидата технічних наук

Миколаїв 2008

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Лебедєв Юрій Михайлович, Національний університет  
кораблебудування імені адмірала Макарова, кафедра  
зварювального виробництва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Савицький Михайло Михайлович,  
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН  
України, м. Київ, керівник відділу «Фізико-  
металургійні процеси зварювання середньолегованих  
високоміцних сталей».

доктор технічних наук, професор Кузнєцов Валерій  
Дмитрович,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ,  
завідувача кафедри відновлення деталей машин.

Захист відбудеться " 13 " жовтня 2008 року о 11 00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, за адресою: 54025. м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9.

**З дисертацією можна ознайомитись** у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий 11.09.2008 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор

М.І. Радченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Однією з вимог до деталей машин і конструкцій, що працюють в умовах абразивного зношування, є підвищена зносостійкість. Вона досягається шляхом нанесення на поверхню спеціальних зносостійких покриттів або створенням поверхневих шарів сталі із заданими властивостями. Одним зі способів підвищення зносостійкості, що не вимагає надто складного обладнання та значних витрат, є поверхнєве загартування. Традиційно для загартування робочих поверхонь деталей машин використовують нагрівання металу струмами високої частоти з наступним швидким охолодженням. При цьому для нелегованих і низьколегованих низьковуглецевих сталей отримати істотне підвищення твердості поверхневих шарів не вдається через їх дуже високі значення критичних швидкостей охолодження. Тому для загартування поверхневих шарів таких сталей доцільно застосовувати локальні джерела нагріву. Ефективність таких джерел для поверхневого зміцнення сталей з високою прогартовуваністю підтверджується світовою практикою і має безумовний науковий і практичний інтерес.

Поверхнєве зміцнення нагріванням локальними джерелами протікає з великими швидкостями охолодження, що забезпечує утворення структур з високою твердістю в прогрітих шарах металу. Водночас, при великих швидкостях нагрівання й охолодження структура загартованого шару низьковуглецевих низьколегованих і конструкційних сталей - характеризується значною неоднорідністю по вуглецю через недостатній час його розподілу в аустеніті. Найкраще цей процес можна простежити на прикладі сталей з вихідною феритно-перлітною структурою.

Аналіз способів нагрівання доводить, що для поверхневого загартування найдоцільніше використовувати нагрівання дугою з неплавким електродом. Дуговий розряд має істотно більший перетин плями нагрівання і меншу питому потужність порівняно з електронним і лазерним променями, що збільшує час перебування металу при високих температурах у процесі його обробки. При цьому досягаються швидкості охолодження достатні для перетворення аустеніту по мартенситному механізму, що забезпечує необхідний рівень міцності і зносостійкості поверхні. Крім того, розробка технології поверхневого зміцнення для низьковуглецевих низьколегованих і конструкційних сталей дає можливість у деяких випадках відмовитися від застосування дорогих легованих сталей підвищеної прогартовуваності й забезпечує істотний економічний ефект.

Зв'язок з науковими програмами. Дослідження проводилися в рамках держбюджетних науково-дослідних розробок на замовлення Міністерства освіти і науки України за напрямком Національної науково-технічної програми "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в

енергетиці, промисловості та агропромислового комплексу", тема "Дослідження фізико-хімічних процесів і розробка технології поверхневого зміцнення сталей з низкою прогартуваністю методом загартування" № ГР – 0102U001016 (№ 1428 2001-2003 р.), тема "Наукові основи технології з'єднання жароміцних, туготопких, керамічних і композиційних матеріалів стосовно газових турбін та енергетичних пристроїв спеціального призначення" № ГР - 0102U005200 (№ 1417 2002-2004 р.).

Метою наукового дослідження є встановлення закономірностей впливу теплових процесів нагріву дугою з неплавким електродом з додатковим зовнішнім магнітним полем і без нього на геометричні розміри зони прогріву та структурні перетворення низьколегованих низьковуглецевих сталей, розробка технології поверхневого зміцнення сталей з низьколегваною і низьковуглецевою структурою шляхом нагрівання дугою з неплавким електродом, яка враховує встановлені особливості.

Основні завдання наукового дослідження:

розробити методику дослідження теплових процесів нагрівання при поверхневому зміцненні дугою з неплавким електродом з магнітним керуванням;

розробити устаткування для проведення досліджень теплових процесів при гартуванні;

скласти методику дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на дугу з неплавким електродом;

дослідити фазові перетворення в сталях з вихідною феритно-перлітною структурою при різних способах нагрівання плоских і циліндричних поверхонь дугою з неплавким електродом;

розробити технологію поверхневого зміцнення низьковуглецевих низьколегованих сталей дугою з неплавким електродом.

Об'єкт дослідження - теплові процеси та фазові перетворення при дуговій обробці поверхні конструкційних сталей.

Предмет дослідження - теплові процеси при обробці поверхні магнітокерованою дугою з неплавким електродом низьковуглецевих низьколегованих сталей і їхній вплив на геометрію зони зміцнення та службові характеристики виробу.

Методи дослідження. Для вивчення впливу теплових процесів було застосовано математичне моделювання, що ґрунтується на законах теплопередачі. Дослідження фазового складу отриманої структури поверхневого шару за допомогою металографічного макро- і мікроаналізу. Випробовування на зносостійкість проводилися відповідно до ГОСТ 23.208-79 "Обеспечение износостойкости изделий". Статистична обробка даних проводилась з використанням ПЕОМ.

Наукові результати, які автор захищає, та їхня новизна:

вперше розроблено спосіб поверхневого загартування низьковуглецевих сталей з первинною феритно-перлітною структурою. Поверхнєве зміцнення таких сталей здійснюється багаторазовим прогрівом поверхневих шарів до температур аустенітного стану 1200...1250 °С без оплавлення дугою з неплавким електродом з наступним охолодженням зі швидкістю 450...500 °С/с. Це дозволяє підвищити твердість поверхневих шарів у два-три рази залежно від вмісту вуглецю в основному металі;

встановлено, що шляхом сканування дугового розряду з неплавким електродом змінним поперечним магнітним полем його можна перевести в смугове джерело нагріву, що дозволяє збільшити ширину загартування і проводити нагрів поверхні без оплавлення на максимально можливих режимах горіння дуги, які обумовлені стійкістю неплавких електродів;

вперше розроблено математичну модель, що дозволяє залежно від вмісту вуглецю в сталі оцінити необхідний бал зерна, який зумовлює максимальне підвищення твердості загартованого поверхневого шару шляхом його прогріву;

розроблено методику розрахунку термічних циклів і максимальних температур при нагріванні рухомим смуговим джерелом нагріву шляхом розбивання його  $n$ -кратними рухомими точковими, яка спрощує розрахункові формули і дає можливість оперативно оцінити умови нагріву-охолодження в різних точках металу, що нагрівається.

Достовірність результатів досліджень забезпечена коректною постановкою мети й задач дослідження; застосуванням сучасних методів випробувань (метод зносостійкості) і необхідною точністю експерименту, дублюванням вимірів основних параметрів; коректним застосуванням фундаментальних фізичних законів і методів обчислення при розв'язанні рівнянь теплових процесів; узгодженням розрахункових і дослідних даних.

Практична цінність результатів:

- розроблено оптимальний метод зміцнення робочої поверхні коліс, що дозволяє скоротити витрати на механічну обробку після наплавлення перед зміцненням до 15 %, а також зменшити вартість зварювальних матеріалів до 35 %, підвищити продуктивність на 20 %;

- запропоновано алгоритм розрахунку термічних циклів і полів максимальних температур для визначення геометричних характеристик зони зміцнення;

- розроблено технологію поверхневого зміцнення сталей з низьколеговою і низьковуглецевою структурою шляхом нагрівання дугою з неплавким електродом з магнітним скануванням.

**Використання результатів роботи.** Результати досліджень застосовуються на суднобудівному підприємстві Дамен Шипярдс "Океан" для відновлення робочої поверхні кранових коліс.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні дипломних проектів, лабораторних занять з курсів "Термодинаміка і теплові процеси зварювання", "Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань", а також у науково-дослідних роботах студентів.

**Конкретна особиста участь автора** в одержанні наведених у дисертації наукових результатів полягає в узагальненні теоретичних та експериментальних досліджень теплових процесів при поверхневому зміцненні; розробці методики розрахунку теплових процесів під час поверхневого зміцнення з використанням дуги з неплавким електродом зі скануванням; встановленні залежності розмірів зміцнюваної зони та її твердості від величини погонної енергії і напруги на котушці електромагнітного сканера; виявленні впливу вихідної величини зерна сталі на утворення гартівних структур і їх розмір.

**Апробація роботи.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних конференціях: "Кораблебудування: освіта, наука, виробництво", 24-25 вересня 2002 р., м. Миколаїв; II Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів "Зварювання та суміжні технології", 25-27 червня 2003 р., м. Київ; Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців "Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства", 28-31 жовтня 2003 р., м. Миколаїв; Регіональній науково-практичній конференції, присвячений 45-річчю кафедри зварювального виробництва НУК "Сварочное производство и технический прогресс", 1-4 грудня 2004 р., м. Миколаїв; Другій міжнародній конференції "Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах", 13-17 вересня 2004 р., с. Кацивелі, Крим; III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології", 25-27 травня 2005 р., м. Київ; на наукових семінарах НУК.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано тринадцять наукових праць, серед яких 5 статей у фахових виданнях (без співавторів 1), 1 стаття в збірнику праць конференції, 6 тез доповідей, отримано 1 патент України на винахід.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел, який налічує 104 позиції. Робота викладена на 166 сторінках машинописного тексту, містить 8 таблиць і 83 ілюстрації.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У загальній характеристиці роботи обґрунтована актуальність теми, її наукова новизна, подана характеристика сучасного стану проблеми, сформульована мета дослідження, основні положення, які виносяться на захист, наведені дані про практичну значимість роботи, кількість публікацій і структуру дисертаційної роботи.

У першому розділі виконано аналіз опублікованих робіт, що дозволяє виділити окремі способи поверхневого зміцнення поверхні конструкційних сталей без розплавлення локальними джерелами нагріву. Проаналізовані переваги та недоліки дуги з неплавким електродом.

Вироби, що експлуатуються в умовах абразивного зношування, мають сполучати в собі достатню стійкість до зношування та низьку вартість виробництва. Для отримання високої стійкості до зношування деталі виготовляють з дорогих зносостійких матеріалів. Для зменшення вартості та збільшення терміну служби використовують термічну обробку або нанесення зносостійких покриттів. У деяких випадках доцільно застосовувати поверхневу обробку виробу. Традиційно для загартування робочої поверхні деталей машин використовують нагрівання металу струмами високої частоти з наступним швидким охолодженням. Ця методика не є функціональною під час використання недорогих низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Для поверхневого зміцнення низьковуглецевих низьколегованих сталей з усіх розглянутих локальних джерел найдоцільнішим способом є дуга з неплавким електродом (плазмовий струмінь, дуга з вугільним і вольфрамовим електродами).

Були проаналізовані дані про структуру й фазові складові у зміцненому шарі, а також фазові переходи в сталях під час впливу локальних джерел нагріву на поверхню сталі з розплавленням і без нього. При вивченні термодформаційних циклів та діаграм термокінетичного розпаду аустеніту Ст. 3 і 09Г2 було встановлено, що мартенситне перетворення можна отримати при високих швидкостях охолодження.

Під час використання поверхневого зміцнення в промисловому масштабі були розглянуті різноманітні способи підвищення продуктивності. Для обробки поверхні дугою з неплавким електродом був вибраний метод магнітного сканування дуги перпендикулярно руху джерела нагріву.

Таким чином, актуальність даної роботи обумовлена можливістю заощадження енергоресурсів порівняно з відомими способами підвищення працездатності й зниження необхідності використання легованих сталей, які переважно використовують під час виготовлення деталей для роботи на зношування.

**У другому розділі** розглянуто питання, пов'язані з використовуваними для досліджень матеріалами й устаткуванням. Відповідно до поставлених задач вплив поверхневого нагріву дугою з неплавким електродом на структурні перетворення в сталях вивчався на плоских зразках розміром 10x100x100 мм. Розміри циліндричних зразків вибрані з урахуванням зручності виконання металографічного аналізу. Досліджено вплив поверхневого нагрівання дугою з вугільним електродом на структурні зміни і твердість сталей Ст.3, 45, 40Х, 18ХГТ і 30ХГСА. Також використовувались циліндричні зразки у вигляді труб, зовнішнім діаметром 57 мм і товщиною стінки 4 мм. Вибір конструкційних сталей був зумовлений частотністю їх використання у промисловості.

Для проведення досліджень поверхневого зміцнення конструкційних сталей були зібрані установки для обробки циліндричних і плоских зразків. В установках була передбачена можливість встановлення устаткування для магнітного сканування дуги.

Була описана методика металографічного аналізу й устаткування, що використовувалося під час досліджень.

Випробування на зносостійкість проводилися відповідно до ГОСТ 23.208-79 "Обеспечение износостойкости изделий". Сутність методу полягає у виконанні тертя зразків досліджуваного й еталонного матеріалів за однакових умов: тертя здійснюється абразивними частинками, які притискаються до зразків гумовим роликком, що обертається. Зносостійкість випробовуваного матеріалу оцінюють шляхом порівняння його зносу зі зносом еталонного зразка. За результатами проведених дослідів видно, що знос зміцнених зразків нижчий, ніж в еталонному матеріалі. Згідно з розрахунком відносна зносостійкість досліджуваного матеріалу ( $K_{\text{н}}$ ) дорівнює 1,697.

**У третьому розділі** були досліджені особливості нагрівання металу дугою з вугільним електродом.

Найбільш часто дуга з вугільним електродом застосовується на постійному струмі при прямій полярності. У такому випадку не відбувається науглецювання нагрітого металу. При зворотній полярності електрод сильно розігрівається на великій довжині та швидко випаровується. Дуга при зворотній полярності нестійка і не може бути розтягнута більше ніж на 10...12 мм.

При дослідженні впливу сили зварювального струму дуги з вугільним електродом на геометричні характеристики прогріву сталевієї пластини було встановлено, що в діапазоні струму від 60 до 150 А глибина прогріву змінюється від 0,8 до 2,5 мм, а ширина від 3,0 до 5,2 мм. При зворотній полярності дуга нестійка і максимальна довжина дорівнює 12 мм, при прямій полярності дуга стійка і довжина складає 8 мм. При прямій полярності дуга довжиною 4 мм не робить науглецювання розплавленого

нагрітого металу. Металографічні дослідження прогрітих пластин показали, що метал шва після прогріву дугою на змінному струмі насичений вуглецем.

Аналіз розрахункових і експериментальних даних показує, що глибину  $h$  і ширину  $b$  прогріву сталі вугільною дугою на постійному струмі прямої полярності до температур критичної точки  $A_{c1}$  можна оцінити розрахунковим методом за формулою швидкорухомого точкового джерела на поверхні масивного виробу.

Найбільш висока точність у розрахунках досягається для погонної енергії нагрівання близько 3000 Дж/см. Для діапазону погонних енергій від 1750 до 6000 Дж/см похибка у розрахунках щодо експериментальних значень не перевищує 15%. Причому для погонних енергій прогріву менших від 3000 Дж/см розрахунок дає трохи завищений результат, а при більш високих погонних енергіях розрахункові значення  $h$  і  $b$  нижчі від дослідних. При цьому глибина і на півширина зони прогріву до критичної температури  $A_{c1}$  для зазначеного діапазону погонних енергій вугільної дуги змінюється від 2,5 до 7,0 мм.

При нанесенні на поверхню пластини  $K_2CO_3$  знижується напруга на дузі і дещо підвищується струм, також підвищується стабільність горіння дуги. Домішок  $K_2CO_3$  не змінює ширини зони нагрівання, але зменшує на 1 мм глибину прогріву до температури критичної точки  $A_{c1}$ . При змінному струмі  $K_2CO_3$  істотно не впливає на геометричні характеристики.

Для оцінки впливу погонної енергії вугільної дуги на глибину і ширину зони нагріву до температур критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  можна також скористатися дослідними даними, наведеними на рис. 1.

Виконані дослідження показали, що вугільна дуга при прогріванні сталі на змінному струмі малоєфективна і може спричинити значну зміну хімічного складу поверхневого шару металу. Її можна використовувати для нагрівання при поверхневому загартуванні лише у випадках, коли застосування постійного струму неможливе через відхилення дуги в бік основного металу під дією магнітного поля.

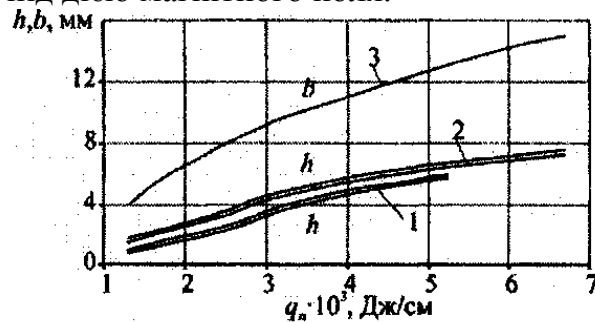


Рис. 1. Вплив погонної енергії нагріву дугою з вугільним електродом на постійному струмі прямої полярності на глибину  $h$  і ширину  $b$  прогріву сталі до температур критичних точок  $A_{c1} - A_{c3}$ : 1 – глибина прогріву сталі з покриттям поверхні  $K_2CO_3$ ; 2 – глибина прогріву сталі без покриття; 3 – ширина прогріву поверхні сталевій пластини.

При малих значеннях повної теплової потужності дуги джерело нагріву є розподіленим і в міру збільшення потужності наближається до зосередженого. Тому при малих погонних енергіях прогріву сталі вугільною дугою для розрахунку термічних циклів зони термічного впливу необхідно використовувати формули для розподілених джерел нагрівання.

Вплив поверхневого нагрівання вугільної дуги на структурні зміни і твердість в сталях вивчався на циліндричних зразках зі сталей 45, 40X, 18ХГТ, 30ХГСА і Ст.3 діаметром 20 мм довжиною 50 мм.

Після прогріву дугою з вугільним електродом середньої частини циліндричних зразків поверхневі шари мають мартенситну і мартенситобейнітну структуру зі значною неоднорідністю по вуглецю. За нетривалий час перебування в аустенітному стані вуглець не встигає продифундувати у центри колишніх феритних зерен, що успадковується в процесі загартовування.

Дослідження розподілу твердості в загартованих поверхневих шарах показало (рис. 2), що глибина загартованого шару досягає 0.4...0.8 мм, а зони термічного впливу 1...1.2 мм. Найбільш висока твердість поверхневого шару, близько 500 НV, спостерігається у сталі 40X. У сталі 30ХГСА шар із твердістю 450 НV має глибину 0,8 мм. Поверхневий шар сталі 18ХГТ має твердість понад 400 НV, а твердість біля поверхні сталі 45 складає 300 НV. Твердість металу Ст.3 після прогріву на відстані від поверхні 0,2 мм складає 270 НV, а на відстані 0,35 мм - 230 НV.

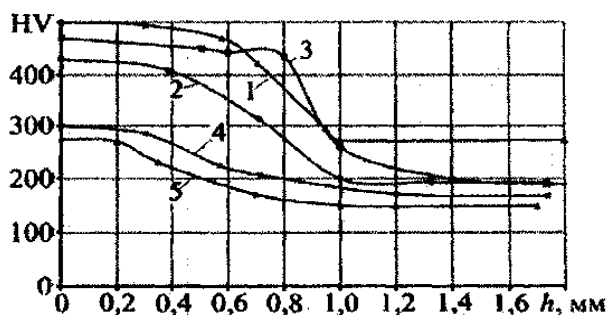


Рис. 2. Зміна твердості поверхневого шару циліндричного зразка після прогріву дугою з вугільним електродом: 1 – 40X; 2 – 18ХГТ; 3 – 30ХГСА; 4 – 45; 5 – Ст.3.

Таким чином, виконані дослідження свідчать про доцільність використання дуги з вугільним електродом для термічної обробки конструкційних сталей. Вона характеризується низькими енерговитратами і може здійснюватися з високою точністю.

У четвертому розділі розглянуті умови поверхневого зміцнення низьколегованих низьковуглецевих сталей дугою з неплавким електродом.

Для дослідження дифузійних процесів і структурних перетворень використовували Ст.10 з малою кількістю перліту, середній розмір зерен якого складав близько 0,01 мм. Прогрів сталі дугою з вугільним

електродом на погонній енергії 500 Дж/с забезпечує режими охолодження, коли аустеніт низьковуглецевих низьколегованих сталей зазнає мартенситного перетворення.

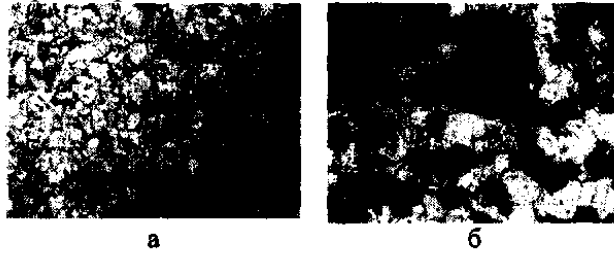


Рис. 3. Мікроструктура Ст.10, х330: а - основний метал; б - після прогріву дугою з вугільним електродом до температур 1300...1200 °С.

Після прогріву дугою з вугільним електродом біля поверхні металу спостерігається складна структура. У вихідній структурі сталей, що складається з фериту і перліту, аустеніт, сформований при швидкому нагріванні, може виявитися неоднорідним по складу. Тому в ділянках, збіднених вуглецем, навіть при швидкому охолодженні аустеніту можливе виділення структурно вільного доевтектоїдного фериту, що за великої кількості знижує твердість загартованої сталі (рис. 3).

Після оцінки впливу стану вихідної феритно-перлітної структури на розподіл вуглецю в аустеніті високотемпературних ділянок при заданих умовах однократного прогріву була розроблена математична модель, яка дозволяє розрахувати критичні умови отримання високої твердості поверхні. Високої твердості поверхневого шару низьковуглецевих сталей з вихідною феритно-перлітною структурою можна досягти вибором сталі з дрібнозернистою вихідною структурою фериту і перліту або ж додатковою підготовкою поверхневих шарів великозернистої сталі, що забезпечує більш рівномірний розподіл по об'єму фаз, які містять вуглець. Одержати такий розподіл вуглецю в об'ємі сталі можна додатковими прогрівами без розплавлення поверхні. При цьому режим охолодження має зупинити перлітне перетворення аустеніту. Кількість таких прогрівів для даної сталі, визначається експериментально.

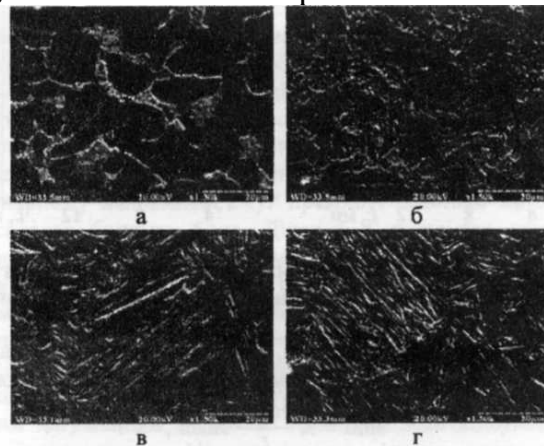


Рис. 4. Мікроструктура поверхневого шару сталі Ст.3, х1500 (знімки виконано на РЕММА-102-02 у режимі топографії): а – основний метал; б – однократний прогрів; в – дворазовий прогрів; г – триразовий прогрів.

Перевірка наведених положень здійснювалася шляхом повторних прогрівів поверхні сталі Ст.3 дугою з вугільним електродом при погонній енергії 500 Дж/с. Однократний прогрів поверхні цієї сталі зумовлює підвищення твердості на глибині 0,2 мм до 270 HV (рис. 4, б). При дворазовому нагріванні твердість поверхневого шару на глибині 0,2 мм складає до 380 HV (рис. 4, в). Крім мартенситу і бейніту структура містить також деяку кількість зерен фериту. Триразовий прогрів забезпечує утворення переважно мартенситної структури в поверхневому шарі і дає підвищення твердості на глибині 0,3 мм до 400 HV, а на глибині 0,6 мм - до 360 HV (рис. 4, г).

Були проведені дослідження поверхневого зміцнення з використанням вольфрамового електрода в середовищі аргону. Конструкційна сталь була прогріта піддана на режимі  $I_d = 180 \text{ А}$ ,  $U_d = 48 \text{ м/ч}$ ,  $U_{\text{хх}} = 72 \text{ В}$ , під час обробки довжина дугового проміжку від 5 до 16 мм. Проаналізувавши оброблені зразки була отримана залежність ширини і глибини зміцненої зони від довжини дуги (рис. 5, а). Відзначена майже прямо пропорційна залежність ширини прогрітої зони від довжини дуги, яку можна пояснити збільшенням погонної енергії дуги: при постійній швидкості поздовжнього переміщення і постійному струмі в міру збільшення дугового проміжку зростає спадання напруги на дузі (рис. 5, б).

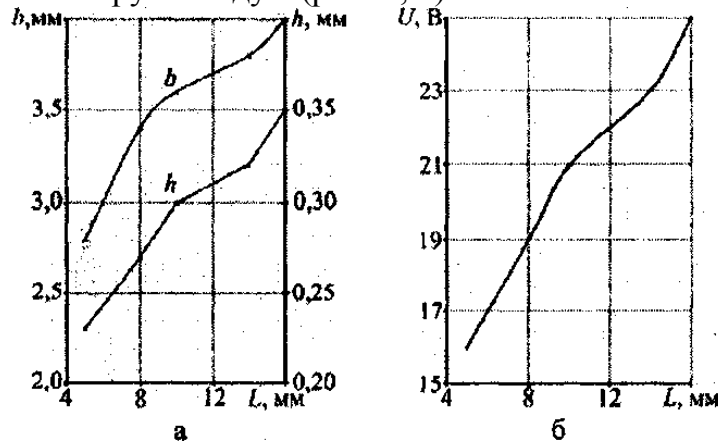


Рис. 5. Криві залежності геометричних характеристик зони нагріву і зміна напруги від довжини дуги: а – ширина і глибина зміцненої зони; б – зміна напруги на дузі.

Слід зазначити, що довжина дуги, що горить у середовищі аргону, у три рази більша, ніж при обробці вугільним електродом. Це підтверджує формула

$$\sin \alpha = K \frac{H_{\text{max}} I_0}{I_d} \sin \omega t,$$

де  $I_0$  – довжина стовпа дуги при асиметричному розташуванні катодної й анодної плям,  $\alpha$  – кут відхилення осі стовпа від осі впливу поперечного магнітного поля,  $H_{\text{max}}$  – напруженість поперечного поля;  $I_d$  – сила струму;  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

З формули випливає, що при збільшенні довжини дугового проміжку зростає кут відхилення стовпа дуги в поперечному магнітному полі. Крім того, великі щільності струму при зміцненні в середовищі

аргону й обдув стовпа дуги струменем газу збільшують значення критичного кута відхилення дуги, тобто мають стабілізуючий вплив. Одним із засобів збільшення геометричних характеристик поверхні поряд з магнітним скануванням дуги є варіювання довжини дугового проміжку при аргонодуговій обробці.

Таким чином, технологічні характеристики прогріву сталей дугою з вольфрамовим електродом прийнятні з погляду поверхневого зміцнення. Результати дослідів доводять, що при максимальній довжині дуги зміцнена зона розширюється в 1,5 раза. Якщо застосувати сканування магнітним полем, то, виходячи з описаних досліджень, зона зміцнення повинна розширитися в 2,1 рази, тобто ширина загартованої смуги порівняно з одним проходом вугільним електродом буде в 3,15 рази вища; звідси підвищення продуктивності процесу і поліпшення умов утворення мартенситних структур, менший час перебування в області високих температур.

Для застосування результатів усіх викладених досліджень на практиці необхідно розглянути процеси, що відбуваються при обробці плоских і циліндричних поверхонь. Для одержання суцільного зміцненого поверхневого шару при прогріві без розплавлення дугою з неплавким електродом для плоских деталей необхідно почергове прогрівання окремими смугами з перекриттям. Застосування дуги з неплавким електродом при обробці плоских поверхонь пов'язане з рядом проблем. Однієї з основних проблем є зона знеміцнення, викликана перекриттям смуг.

На макрошліфі поверхнево обробленого зразка чітко видно зміцнений шар товщиною близько 0,6 мм і твердістю 550...580 НУ, де чергуються темні і світлі смуги. Світлі смуги складаються з мартенситу, а темні являють собою мартенсит відпустки з мінімальним значенням 350 НУ на проміжку в 1 мм. Вимір твердості по ширині зміцненого шару здійснювався в напрямку, перпендикулярному напрямкові смуг прогріву. Відстань між максимумами твердості складає близько 6 мм. Ділянка з твердістю нижчою 450 НУ дорівнює величині обраного кроку зміцнення 3 мм. Рівномірного розподілу твердості в поперечному перерізі щодо смуг прогріву можна досягти збільшенням кроку прогріву або ширини смуг, що прогріваються.

Усі описані особливості зміцнення плоских поверхонь можуть бути застосовані для циліндричних. Відмінність можлива лише для деталей діаметром до 20 мм. При поверхневому загартуванні циліндричних деталей безперервним нагріванням дугою по гвинтовій лінії відбувається постійне підвищення температури. Це сповільнює режим охолодження і для забезпечення рівномірного загартовування поверхневого шару вимагає аналізу впливу автопідігріву. Розроблена методика розрахунку зміни температур при нагріванні точковим зосередженим джерелом циліндричних деталей по гвинтовій лінії дає можливість розрахувати

зміну температури в будь-якій точці циліндра в процесі нагрівання з використанням номограм функції вирівнювання теплоти в тонкому круглому циліндрі. У деяких випадках необхідно застосовувати примусове охолодження деталі. Для сталевих валів діаметром до 50 мм у зв'язку з порівняно високою теплопровідністю низьковуглецевих сталей можна зневажити розходженням температур від автопідігріву в центрі і на поверхні деталі на деякому видаленні від місця розташування джерела.

У п'ятому розділі досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на прогрів сталі дуговим розрядом з неплавким електродом на плоских і циліндричних зразках.

Для збільшення ширини зони нагрівання використовували сканування дугового розряду змінним магнітним полем промислової частоти. Якщо помістити дуговий розряд у магнітне поле, вектори напруженості якого розташовані в напрямку його переміщення, то під дією сили Лоренца, заряджені частинки стовпа дуги будуть відхилятися від прямолінійного руху між катодом і анодом у поперечному напрямку. Величина відхилення обмежена умовами обриву дуги при деякому критичному значенні напруженості магнітного поля.

Дослідження впливу магнітного поля на геометричні характеристики прогріву здійснювали металографічним методом на плоских зразках зі сталі Ст. 3 після нагрівання дугою на спеціалізованій установці.

Вивчення макро- і мікроструктури після прогріву на режимі  $I_d = 150$  А,  $U_d = 25$  В,  $V_n = 36$  м/г показало, що світлі зони (рис. 6) характеризують змінену структуру основного металу, сформовану в результаті прогріву дуговим розрядом. Межею цієї зони є ізотерма критичної точки  $A_{c1}$  (730 °С). При прогріві без впливу на дугу магнітного поля (1) значна частина металу переплавляється. При впливі на дугу магнітного поля глибина прогріву і частка розплавленого металу зменшуються, а ширина зони прогріву збільшується. При цьому рідкий метал, розташований на поверхні зразка, скачується у валик і робить поперечні коливання під впливом зовнішнього магнітного поля, що можна спостерігати на рис. 5 (2, 3). Нарешті при напрузі змінного струму обмотки електромагніта 150 В поверхневий шар зразка (4) не розплавляється, а форма зони прогріву вказує на роздвоєння дуги. При цьому ширина збільшується приблизно в 1,5 раза, а глибина зони перекристалізації складає близько 1,2 мм.



Рис. 6. Вплив магнітного поля на геометричні характеристики прогріву сталі дугою з вугільним електродом на режимах  $I_d = 150$  А,  $U_d = 25$  В,  $V_n = 36$  м/г, (напруга на обмотці електромагніта: 1 – 0 В, 2 – 75 В, 3 – 100 В, 4 – 150 В).

При аналізі даних було встановлено, що з підвищенням напруженості зовнішнього магнітного поля ефективна теплова потужність дуги зменшується. Це пов'язано зі збільшенням площі поверхні стовпа дуги і втратами на теплообмін у навколишнє повітряне середовище, а також з ефектом здування магнітним полем частини плазмового потоку. При напрузі на обмотці електромагніта 150 В, що створює магнітне поле, прийнятне для поверхневого зміцнення при прогріві сталей, ефективна теплова потужність дуги знижується додатково на 40 %. Це зумовлює перевитрату енергії. Однак, щоб зробити висновки про ефективність такої технології необхідно проаналізувати вплив сканування на продуктивність обробки і якість зміцненої поверхні.

При скануванні дуги магнітним полем джерело нагріву з точкового перетворюється в смуговий. Поширення тепла в напівнескінченному тілі не має прямого рішення. Тому для оцінки термічних циклів і максимальних температур смугове джерело, тепловий потік якого рівномірно розподілений по ширині прогріву  $b$ , можна замінити  $n$ -точковими джерелами, ефективна сумарна теплова потужність яких дорівнює ефективній тепловій потужності смугового джерела нагріву. Якщо початок координат  $y_0, z_0$  у вибраному перетині на смугі прогріву помістити на осі прогріву, тоді термічний цикл у будь-якій точці обраного перетину можна розрахувати за формулою

$$T(y, z, t) = \sum_{n=1}^n \frac{q_n}{2\pi\lambda n} \exp\left(-\frac{r_n^2}{4at}\right) + T_n$$

де  $q_n = q/n$  – ефективна теплова потужність окремого точкового джерела,  $n = 1, 2, 3 \dots n$ ,  $r_n = \sqrt{y_n^2 + z_n^2}$  – відстань від розглянутої точки до  $n$ -го джерела,  $T_n$  – початкова температура тіла. При розрахунку термічних циклів були прийняті наступні вихідні дані:  $n = 10$ ,  $a = 0,08 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\lambda = 0,4 \text{ Дж}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot\text{К})$ . Точкові зосереджені джерела з ефективною тепловою потужністю по 135 Вт розташовувалися на відстані  $b/n$ . Ширина зони прогріву була взята з дослідних даних ( $b = 12 \text{ мм}$ ).

Використовуючи ці положення були виконані розрахунки розподілу максимальних температур і термічних циклів для поверхневого прогріву дугою з вугільним електродом без магнітного сканування і скануванням на погонній енергії 500 Дж/с і 1350 Дж/с відповідно. Погонна енергія 1350 Дж/с відповідала прогрівові в магнітному полі при напрузі 150 В на обмотці.

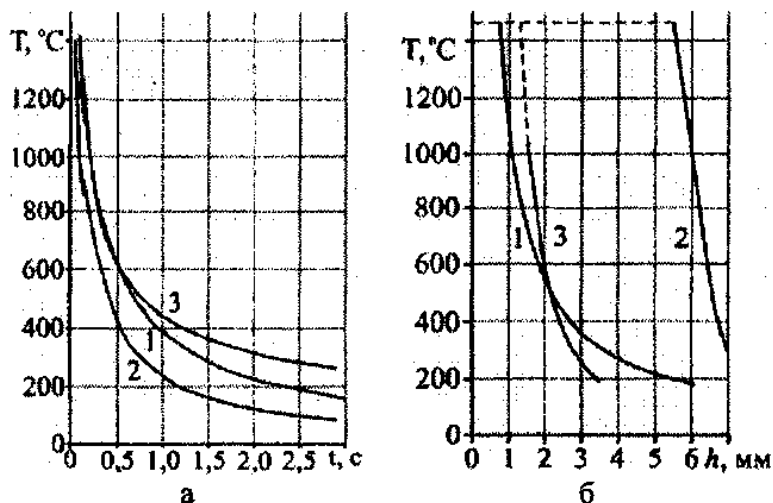


Рис. 7. Термічні цикли (а) і зміна максимальних температур (б) у прогрітій смугі при обробці поверхні дугою в магнітному полі (а: 1 –  $Y=0, Z=0$ ; 2 –  $Y=0,6 \text{ см}, Z=0$ ; 3 –  $Y=0, Z=0$ ; б: 1 – розподілення максимальних температур по глибині прогріву (вісь  $Z$ ) дугою в магнітному полі; 2 – розподілення максимальних температур на поверхні прогріву (вісь  $Y, Z=0$ ) дугою в магнітному полі; 3 – розподілення максимальних температур залежно від  $r_0$  дугою без магнітного поля).

Результати розрахунку розподілу максимальних температур добре збігаються з дослідними даними про розміри зони перекристалізації. Глибина

прогріву становить близько 1,3 мм, а ширина 12,5 мм. Аналогічний збіг дослідних даних з розрахунком отримано і при розподілі максимальних температур при нагріванні дуговим розрядом без впливу зовнішнього магнітного поля.

Порівнюючи термічні цикли (рис. 7) для точок, розташованих по осі нагрівання (1) і наприкінці смуги нагрівання (2), видно, що точки біля краю нагрівання охолоджуються більш різко. При цьому середня швидкість охолодження в інтервалі температур від лінії солідус до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  для точок поблизу осі нагрівання складає близько  $1000 \text{ }^\circ\text{C/s}$ , для точок біля краю нагрівання - близько  $2000 \text{ }^\circ\text{C/s}$ . Така швидкість охолодження практично не досягається при традиційних способах термічної обробки, що дозволяє нагріванням локальними тепловими джерелами робити поверхневе загартовування практично для всіх марок вуглецевих і низьколегованих сталей.

Оцінка впливу наступних прогрівів, виконуваних з невеликим перекриттям попередніх для одержання суцільного зміцнення поверхні на процеси відпустки раніше загартованого металу показує перевагу застосування технології прогріву сканованою дугою. Так ширина зони максимальних температур від критичної точки  $A_{c1}$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  при скануванні дуги магнітним полем складає 0,7 мм, тоді як при прогріві без впливу на дугу магнітного поля ширина цього інтервалу максимальних температур дорівнює 1,7 мм. Тому розподіл твердості в поверхневому

шарі при прогрівах дугою, що сканується магнітним полем, більш рівномірний, ніж при прогрівах звичайним дуговим розрядом.

У цьому розділі також подано опис застосування поверхневого зміцнення при відновленні робочої поверхні кранових коліс.

## ВИСНОВКИ

1. Застосування поверхневого зміцнення дозволяє підвищити працездатність деталей машин і конструкцій, що експлуатуються в умовах абразивного зношування або руйнуються від втоми. Це досягається шляхом

зміцнення поверхневих шарів сталі різними способами з використанням локальних джерел нагрівання (лазерний і електронний промені, плазмовий струмінь), які широко застосовуються в промисловості для поверхневого загартування конструкційних легированих сталей. Найбільш простим і дешевим

способом поверхневого зміцнення є застосування дуги з неплавким електродом.

2. Для прогріву без розплавлювання поверхневих шарів сталі дугою з вугільним електродом погонна енергія нагрівання не повинна перевищувати 500 Дж/с. При такому значенні погонної енергії швидкості охолодження ділянок, прогрітих вище за критичну точку  $A_{c3}$ , у кілька разів перевищують швидкості загартування для конструкційних сталей.

3. Обґрунтовано, що істотне підвищення твердості низьковуглецевих сталей з вихідною феритно-перлітною структурою після однократного нагрівання без розплавлювання дугою з неплавким електродом може бути досягнуто тільки для дрібнозернистих сталей з балом зерна № 7 і більшим. Для великозернистих низьковуглецевих сталей одержання високої твердості при поверхневому загартуванні шляхом нагрівання дугою з неплавким електродом необхідна попередня підготовка структури поверхневих шарів.

4. Висока твердість поверхневих шарів шляхом загартування досягається додатковими прогрівами поверхні з метою більш рівномірного перерозподілу вуглецю по об'єму металу й одержанню після остаточного прогріву мартенситу із середнім вмістом вуглецю, близьким до вмісту його в даній сталі.

5. Встановлено, що сканування магнітним полем дугового розряду з неплавким електродом під час поверхневого загартування сталей дозволяє перетворити джерело нагріву з точкового на смуговий і виконувати обробку поверхні без її розплавлювання практично на будь-яких режимах доступних по стійкості для обраного електрода.

6. Показано, що сканування магнітним полем дугового розряду підвищує продуктивність поверхневої обробки, створює рівномірний по глибині загартований шар і зменшує розмір зони відпустку, водночас зменшується ефективний ККД нагрівання дуги до 17 %.

7. Створена методика розрахунків теплових прогрівів металів смуговими джерелами узгоджується з дослідними даними і є теоретичною базою для розробки технології поверхневого зміцнення сталей дугою, що сканується магнітним полем.

8. Виявлено, що низьковуглецеві сталі мають високу температуру закінчення мартенситного перетворення і тому їхнє поверхневе загартування нагріванням дугою з неплавким електродом може виконуватися без примусового охолодження.

9. Перспективою подальшого використання отриманих результатів може бути застосування поверхневої обробки для здрібнювання структури крайок виробу перед зварюванням.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Мартыненко В.А. Применение дуги с неплавящимся угольным электродом при поверхностной обработке сталей с низкой прокаливаемостью / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // Автоматическая сварка. - 2004. - № 8. - С. 24-29.

Особистий внесок автора: проведено експериментальні дослідження з поверхневого зміцнення конструкційних сталей; знайдено мінімальні значення шляху дифузії для різних сталей.

2. Деклараційний патент на винахід UA 54030 А Україна, 7С21D1/09. Спосіб поверхневого загартування сталей з низькою прогартовуваністю / Лебедев Ю.М., Мартыненко В.О.; заявник та патентовласник Український державний морський технічний університет. - № 2002043348; заявл. 23.04.2002; опубл. 17.02.2003 Бюл. - № 2.

Особистий внесок автора: проведено експериментальні дослідження з поверхневого зміцнення і металографічні дослідження низьковуглецевої сталі Ст. 3; за теоретичними розрахунками побудовані залежності розміру ребра  $A$  куба до діаметра перлітного зерна  $D$  від об'ємної частки перліту  $v$  і об'ємної частки перліту  $v$  від концентрації вуглецю в низьковуглецевих сталях.

3. Мартыненко В.А. Технологические особенности поверхностного упрочнения сталей дугой с неплавящимся электродом, сканируемой магнитным полем / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // 36. наук, праць НУК.- Миколаїв: НУК. - 2006. - № 4 (409). - С. 96-104.

Особистий внесок автора: проведено експериментальні й теоретичні дослідження з поверхневого зміцнення конструкційних сталей із

застосуванням магнітного сканування дуги для підвищення продуктивності процесу.

4. Мартыненко В.А., Использование неплавящегося вольфрамового электрода в среде аргона для поверхностного упрочнения конструкционных сталей / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко, Yu Zhishui // 36. наук, праць НУК. - Миколаїв: НУК. - 2007. - № 4 (415). - С. 58-64.

Особистий внесок автора: проведено теоретичні дослідження з поверхневого зміцнення конструкційних сталей із застосуванням дуги з вольфрамовим електродом.

5. Мартыненко В.А. Особенности нагрева стали дугой с угольным электродом / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // 36. наук, праць НУК. - Миколаїв: НУК. - 2007. - № 5 (416). - С. 49-57.

Особистий внесок автора: проведено експериментальні й теоретичні дослідження особливостей нагрівання металу дугою з вугільним електродом.

6. Мартыненко В.А. Особенности поверхностного упрочнения конструкционных сталей без расплавления поверхности дугой с неплавящимся электродом / В.А. Мартыненко // 36. наук, праць НУК. - Миколаїв: НУК. - 2007. - № 6 (417). - С. 88-95.

Особистий внесок автора: проведено експериментальні й теоретичні дослідження поверхневого зміцнення конструкційних сталей дугою з неплавким електродом.

7. Мартыненко В.А. Особенности поверхностного упрочнения цилиндрических деталей из углеродистых и низколегированных сталей нагревом дугой с неплавящимся электродом / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // Сборник трудов. Вторая междунар. конф. "Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах". - К.: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. - 2004 - С. 151-156. Особистий внесок автора: проаналізовано теоретичні розрахунки, подано методику розрахунку термічних циклів для циліндричних виробів малих діаметрів (20...40...40 мм).

8. Мартыненко В.А. Поверхностное упрочнение судостроительных сталей нагревом дугой с неплавящимся электродом / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // Матеріали міжнародної конференції: Кораблебудування освіта, наука, виробництво: В 2 т. — Миколаїв: УДМТУ. —2002. -Т. II.-С. 69.

Особистий внесок автора: розроблено методику дослідження поверхневого зміцнення і проведені дослідження сталі Ст.3.

9. Мартыненко В.А. Применение прогрева с неплавящимся электродом для поверхностной закалки низкоуглеродистых низколегированных сталей / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // 36. труд.

II Всеукраїнська науково-технічна конф. молодих учених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології". - К. - 2003. - С. 42.

Особистий внесок автора: проведено металографічні дослідження низьковуглецевої сталі Ст.3. після поверхневого зміцнення, а також розглянута залежність твердості від кількості прогрівів.

10. Мартыненко В.А. Особенности поверхностной закалки низкоуглеродистых низколегированных сталей нагревом дугой с неплавящимся электродом / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых научных работников "Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства". 28-31 октября. - Николаев. - 2003. - С. 112-115.

Особистий внесок автора: проведено дослідження поверхневого зміцнення конструкційних сталей; знайдено критичні параметри погонної енергії для запобігання розплавлення поверхні.

11. Мартыненко В.А. Повышения эффективности поверхностной закалки сталей сканированием дуги с неплавящимся электродом / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко, Д.Р. Аврамец // Материалы Региональной научно-практической конференции посвященной 45-летию кафедры сварочного производства НУК "Сварочное производство и технический прогресс". 1-4 декабря. - Николаев. - 2004. - С. 111.

Особистий внесок автора: розроблено методіку і проведено дослідження з магнітним скануванням дуги.

12. Мартыненко В.А. Особенности поверхностного упрочнения цилиндрических деталей из углеродистых и низколегированных сталей дуговым нагревом с использованием угольного электрода / Ю.М. Лебедев, В.А. Мартыненко // Тез. докл. Вторая между. конф. "Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах". - К.: ИЭС им. Е.О. Пагона НАН Украины. - 2004 - С. 40. Особистий внесок автора: виконано металографічний аналіз зміцнених зразків конструкційних сталей.

13. Мартыненко В.А. Влияние внешнего переменного магнитного поля на поверхностный прогрев сталей и сплавов дуговым разрядом с неплавящимся электродом / Ю.М. Лебедев, В. А. Мартыненко // Зб. Труд. III Всеукраїнська науково-технічна конф. молодих учених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології". - К. —2005 - С. 21.

Особистий внесок автора: досліджено процеси, що відбуваються під час магнітного сканування дуги, зокрема встановлена залежність зниження ККД від напруги на пристрої, який відхиляє дугу.

## АННОТАЦИЯ

Мартыненко В.А. "Разработка технологии поверхностного упрочнения низколегированных низкоуглеродистых сталей при помощи дуги с неплавящимся электродом". - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 - Сварка и родственные процессы и технологии. Национальный кораблестроительный университет имени адмирал Макарова Министерства образования и науки Украины, Николаев, 2007г.

Диссертационная работа посвящена разработке технологии поверхностного упрочнения низкоуглеродистых низколегированных сталей (на примере Ст.3 и 09Г2) дугой с неплавящимся электродом (дуга с угольным и вольфрамовым электродами); изучению влияния основных параметров поверхностного упрочнения на структуру и механические свойства упрочненного слоя.

Для исследований были разработаны экспериментальные установки для поверхностного упрочнения плоских и цилиндрических поверхностей со сканированием дуги.

Исследовано влияние поверхностного нагрева дугой с угольным электродом на структурные изменения и твердость сталей 45, 40Х, 18ХГТ, 30ХГСА и Ст.3. Режимы прогрева при длине дуги 3..4 мм. Наиболее высокая твердость поверхностного слоя 500 HV у стали 40Х. У стали 30ХГСА слой с твердостью 450 HV на глубине 0,8 мм. Поверхностный слой стали 18ХГТ имеет твердость выше 400 HV, а твердость у поверхности стали 45 - 300 HV. Твердость Ст.3 на расстоянии от поверхности 0,2 мм - 270 HV, а на расстоянии 0,35 мм — 230 HV.

Установлено, что высокой твердости поверхностного слоя низкоуглеродистых сталей с исходной ферритно-перлитной структурой можно достичь дополнительными прогревами без расплавления поверхности. Однократный прогрев поверхности такой стали приводит к повышению твердости на глубине 0,2 мм до 270 HV. При двукратном нагреве твердость поверхностного слоя на глубине 0,2 мм составляет до 380 HV. Трехкратный прогрев обеспечивает образование преимущественно мартенситной структуры в поверхностном слое и дает повышение твердости на глубине 0,3 мм до 400 HV, а на глубине 0,6 мм - до 360 HV.

Применение дуги с неплавящимся электродом при обработке плоских поверхностей связана с рядом проблем. Одной из основных проблем при поочередном прогреве отдельными полосами поверхности является зона разупрочнения, которая вызвана перекрытием полос. Равномерного распределения твердости в поперечном сечении

относительно полос прогрева можно достичь увеличивая шаг прогрева или ширину прогреваемых полос.

При обработке поверхности с магнитным сканированием угольной дуги был получен образец с шириной зоны разупрочнения 2 мм и минимальной твердостью 400 HV. Расстояние между максимумами твердости составляет около 2,5 мм. Участок с твердостью ниже 450 HV меньше 1 мм. Применение магнитного сканирования дуги позволяет увеличить твердость в зоне перекрытия упрочняемых полос и уменьшить количество проходов.

Из анализа полученных данных видно, что применение сканирования дуги позволяет увеличить ширину зоны упрочнения до 13 мм в зависимости от напряжения на сканирующем устройстве, но в тоже время уменьшается высота от 1,6 до 0,6 мм.

Разработанный автором во время выполнения диссертационной работы алгоритм расчета термических циклов и полей максимальных температур при упрочнении поверхностного слоя на плоских и цилиндрических образцах дугой с неплавящимся электродом с магнитным сканированием дуги и без него, а также данные проведенного анализа влияния нагрева на геометрические характеристики зоны упрочнения низколегированных и конструкционных сталей используются на лекционных и практических занятиях при преподавании курсов "Термодинамика и тепловые процессы сварки", "Наплавка металлов" и "Металловедение и термическая обработка сварных соединений". Полученные результаты позволяют ознакомить студентов специальности "Оборудования и технология сварки" дневной и заочной форм обучения с основными принципами поверхностной закалки сталей дугой с неплавящимся электродом.

Предложенные в диссертационной работе основные принципы поверхностного упрочнения низкоуглеродистых низколегированных и конструкционных сталей, а также алгоритм расчета термических циклов и полей максимальных температур используются при восстановлении крановых колес на ОАО "Дамен Шипярдс "Океан".

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, низколегированная сталь, неплавящийся электрод, поверхностное упрочнение, сканирующее устройство, вольфрамовый электрод, аргонодуговая обработка, износ, термическая обработка.

## **АНОТАЦІЯ**

Мартиненко В.О. "Розробка технології поверхневого зміцнення низьколегованих низьковуглецевих сталей за допомогою дуги з неплавким електродом". - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології. Національний кораблебудівний університет імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, Миколаїв, 2007р.

Дисертаційна робота присвячена розробці технології поверхневого зміцнення низьковуглецевих низьколегованих сталей (на прикладі Ст.3 і 09Г2) дугою з неплавким електродом (дуга з вугільним і вольфрамовим електродами); вивченню впливу основних параметрів поверхневого зміцнення на структуру і механічні властивості зміцненого шару.

Під час первинних дослідів було встановлено, що для поверхневого зміцнення можна використовувати дугу з неплавким електродом. Вона дозволяє проводити локальний нагрів з високими швидкостями охолодження.

Установлено, що високої твердості поверхневого шару низьковуглецевих сталей з вихідною феритно-перлітною структурою можна досягти додатковими прогрівом без розплавлювання поверхні. Однократний прогрів поверхні цієї сталі зумовлює підвищення твердості на глибині 0,2 мм до 270 HV. При двократному нагріві твердість поверхневого шару на глибині 0,2 мм складає до 380 HV. Трикратний прогрів забезпечує утворення переважно мартенситної структури в поверхневому шарі і дає підвищення твердості на глибині 0,3 мм до 400 HV, а на глибині 0,6 мм - до 360 HV.

При обробці поверхні з магнітним скануванням вугільної дуги був отриманий зразок із шириною зони знеміцнення 2 мм і мінімальною твердістю 400 HV. Відстань між максимумами твердості складає близько 2,5 мм. Ділянка з твердістю нижчою за 450 HV менша від 1 мм. Застосування магнітного сканування дуги дозволяє збільшити твердість у зоні перекриття зміцнюваних смуг і зменшити кількість проходів.

Запропоновані в дисертаційній роботі основні принципи поверхневого зміцнення низьковуглецевих низьколегованих і конструкційних сталей, а також алгоритм розрахунку термічних циклів і полів максимальних температур використовуються при відновленні кранових коліс на ВАТ "Дамен Шип'ярдс "Океан".

**Ключові слова:** низьковуглецева сталь, низьколегована сталь, неплавкий електрод, поверхневе зміцнення, сканувальний пристрій, вольфрамовий електрод, аргондогова обробка, знос, термічна обробка.

## ANNOTATION

Martynenko V.A. "Creating the technology of surface stability of low-alloy and low-carbonated steels with the help of the arc with the nonconsumable electrode". - Manuscript.

Dissertation to receive a scientific degree of Candidate of Technical sciences on a specialty 05.03.06 - Welding and alike processes and technologies. Admiral Makarov National university of shipbuilding Ministry of Education and science of Ukraine, Mykolayiv, 2007.

Dissertation is devoted to creating a technology of surface stability of low-carbonated and low- alloy steels( on St.3 и 09Г2) by arc with nonconsumable electrode (arc with carbon and volfram electrodes), studying the influence of main parameters of surface hardening on the structure and mechanical properties of a stable layer.

During the first experiments it was figured out that for the surface hardening an arc with a неплавким electrode can be used. It allows to conduct the local heating at a high speed of cooling.

It is stated that the high hardness of surface layer of low-carbon steels with ferrite-pearlite structure can be achieved by additional heating without fusing of the surface. One heating of the steel surface results in hardening at the depth of 0,2 mm is from 270 HV. At the second heating the hardness of the surface layer at the depth of 0,2 mm makes up to 380 HV. The third heating provides the creating of mostly martensite structure in a surface layer and results in the increase of temperature at a depth of 03 mm up to 400 HV, and at a depth of 0,6 mm - up to 360 HV.

When processing the surface by magnet scanning of carbon arc a model with width of instability zone of 2 mm and minimum hardness of 44 HV was received. Distance between the maximums of hardness is about 2,5 mm. A piece with hardness less than 450 HV is less than 1 mm. Application of magnet scanning of the arc helps increase the hardness in a zone of over connection of stable rows and diminish the number of passing.

The main principles of surface hardening of low-carbonate and low-alloy, and constructing steels, as well as the calculating algorithm for thermal cycles and fields of maximum temperatures offered in the dissertation are used to renovate the crane wheels on Damen Shipyards "Okean".

Key words: low-carbon steel, low-alloy steel, nonconsumable electrode, surface hardening, scanner, temperature of heating, argon-arc processing, deterioration, heat treatment.

**Свідоцтво про внесення суб'єкта'видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК №2506 від 25.05.2006.**

**Підписано до друку 02.09.2008. Папір офсетний. Формат 60X84/16 Гарнітура Тайме. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,8. Обл.- вид. арк. 0,9.**

**Тираж 120 прим. Зам. № 262. Друкарня видавництва Національного університету кораблебудування, 54002, м.Миколаїв, вул. Скороходова, 5**