

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова**

ГОЛОБОРОДЬКО ЖОРЖ ГАВРИЛОВИЧ

УДК 629.5.002

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ
ЛИСТОВИХ СУДНОКОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ
ПОВІТРЯНО-ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ З ДОДАВАННЯМ
ВОДИ**

**Спеціальність 05.08.04 - Технологія суднобудування та
судноремонту**

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук**

Миколаїв-2005

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент Квасницький Віктор Вячеславович,
Регістр судноплавства України, м. Київ, старший експерт

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Дубовий Олександр Миколайович,
Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв, перший проректор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів;
доктор технічних наук, професор Кузнецов Валерій Дмитрович
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, завідувач кафедри відновлення деталей машин

Провідна установа:

Одеський національний морський університет, Міністерства освіти і науки України м. Одеса.

Захист відбудеться 4 липня 2005 р. о 10 год 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9, головний корпус НУК

Автореферат розіслано " 03 " 06 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

С.С. Рижков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливими технологічними операціями; що визначають якість виготовлення деталей, їх зварювання та судна в цілому, є термічне та механічне різання. Із загальної кількості металу, який обробляється в суднобудуванні, біля 80 % припадає на термічне різання. Якість вирізаних деталей визначає трудомісткість складальних і зварювальних робіт. Відхилення від номінальних розмірів деталей призводить до збільшення об'єму наплавленого металу і зварювальних деформацій.

Основним способом термічного різання є плазмове різання з використанням в якості плазмоутворюючого газу повітря. Накопичений досвід показав техніко-економічні переваги та перспективність повітряно-плазмового різання (ППР) суднокорпусних деталей, однак виявив також певні недоліки: неперпендикулярність кромок різку при найбільш поширених у суднобудуванні товщинах металу може досягати 2,5 мм на сторону, що суттєво впливає на об'єм наплавленого металу, продуктивність і якість зварювання; в процесі різання відбувається насичення кромок металу азотом і при автоматичному зварюванні під флюсом вирізаних деталей із металу товщиною 5... 12 мм у зварних швах утворюються пори.

Питанням підвищення якості виготовлення деталей та удосконалення ППР присвячені роботи К.В. Васильєва, В.Д. Горбача, В.Л. Дзюби, Л.О. Кохлик'яна, Е.М. Есіб'яна, В.Д. Кузнєцова, Г.І. Лащенко, В.М. Котикова, С.В. Петрова та інші. Розроблені заходи щодо усунення недоліків ППР не завжди ефективні. Механічна обробка кромок після різання або зварювання першого проходу шва в середовищі вуглекислого газу зводять нанівець переваги повітряно-плазмового різання. Використання кисню як плазмоутворюючого газу різко збільшує витрати швидкозношуваних деталей сопел, електродів і вимагає додаткового захисту від азоту навколишнього середовища. Застосування плазмового різання під водою вимагає великих капітальних витрат на закордонне обладнання, що для більшості суднобудівних заводів України на сучасному етапі не реальне. Цю складну технологічну задачу можна вирішити на основі дослідження закономірностей впливу різних факторів на процеси і якість різання та зварювання вирізаних деталей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні етапи дисертації виконані відповідно до планів науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України за темами 9/1347 "Дослідження взаємодії елементів і фаз в складних металічних системах та з газовим середовищем, стосовно зварювальних та споріднених процесів, а також закономірностей виникнення власних напружень з врахуванням пружно-пластичного стану різнорідних з'єднань" (1998...2001 р.р., № ДР0100U003108) та 1512 "Розробка технології плазмового різання стосовно машин "Кристал", що забезпечує зменшення скошу кромок вирізаних деталей і попередження пороутворення при їх зварюванні" (2003...2004 р.р. № ДР0104U009101). Рівень участі в роботах - відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка високопродуктивної технології виготовлення листових суднокорпусних деталей методом повітряно-плазмового різання з додаванням води (ППРДВ), що забезпечує підвищення якості виготовлених деталей та зварних суднових конструкцій із сталей категорій Д32 та Д40.

Для досягнення вказаної мети було сформульовано і вирішено наступні задачі:

- досліджено якість ППР суднокорпусних сталей та його вплив на якість зварювання виготовлених деталей;
- шляхом математичного моделювання досліджено хімічний склад газової фази, що взаємодіє з металом як при ППР, так і з додаванням до

- повітря води, а також закономірності його зміни залежно від кількості водяної пари;
- розроблено методику і виготовлено обладнання для експериментального дослідження розподілу води, що додається до повітряної плазми, та продуктів синтезу при гартуванні плазми;
- встановлено закономірності впливу технологічних параметрів ППРДВ на якість кромок вирізаних деталей;
- виявлено закономірності впливу плазмоутворюючого середовища при різанні деталей на утворення пор при автоматичному зварюванні під флюсом виготовлених деталей;
- встановлено граничні витрати води, що додається до повітряної плазми, які забезпечують стабільність якості різання і зварювання деталей;
- розроблено технологію та нормативну документацію на виготовлення листових суднокорпусних деталей методом ППРДВ, проведено її випробування та промислове впровадження.

Об'єкт дослідження - виготовлення листових суднокорпусних деталей методом ППРДВ.

Предмет дослідження - вплив плазмоутворюючого середовища і технологічних параметрів на якість виготовлення деталей та зварних суднокорпусних конструкцій.

Методи дослідження. Теоретичною і методологічною основою дослідження є роботи вітчизняних та іноземних вчених в галузі технології суднобудування, плазмохімічних процесів та їх моделювання. Склад газової фази визначали шляхом розрахунків, для яких застосовували кінетичну схему, що включає 258 реакцій з 58 компонентами.

Для експериментальної частини досліджень виготовили спеціальну установку для гартування плазми. Сполуки азоту та водню виявляли шляхом хімічного аналізу гартівного середовища.

Дослідження якості різання проводили з використанням профілографи та профілометри, макро- та мікроструктурного аналізів, визначенням мікротвердості металу. Вирізані зразки із сталі категорії Д32 товщиною 10 мм випробували на втомленість при знакозмінному вигині на базі 10^7 циклів.

Всі дослідження проводилися на сталях категорій Д32, Д40.

Наукова новизна отриманих результатів. Науково обґрунтовано вплив додавання води до повітряної плазми на підвищення якості виготовлення листових суднокорпусних деталей та зварних конструкцій.

Моделювання складу газової фази при ППРДВ показало, що при додаванні води в результаті плазмохімічних реакцій парціальний тиск азоту в плазмі зменшується, а також утворюються газові суміші з воднем, який підвищує напруженість електричного поля дуги і зменшує розчинення азоту в сталі.

Іншим позитивним фактором впливу води в повітряній плазмі є додаткове обтіснення плазмової дуги, оскільки за експериментальними даними участь у плазмохімічних реакціях приймає лише 9,5... 12,6% води, що подається в плазму. Це сприяє заглибленню анодної плями по товщині металу та у 2,3...2,5 рази зменшує неперпендикулярність кромок різку.

Досліджено вплив технологічних параметрів ППРДВ на якість вирізаних деталей. Збільшення швидкості різання збільшує неперпендикулярність кромок, а збільшення витрат повітря від 50 до 120 л/хв. зменшує її. При додаванні води в плазму від 0,023 до 0,11 л/хв. (5,6... 19,2 % пари в плазмі) неперпендикулярність кромок різку відповідає вимогам ГОСТ 14792-80.

Установлено, що при ППРДВ і стабілізації катодної плями з обертанням газового потоку за годинниковою стрілкою, внаслідок пульсації дуги і затримки анодної плями перед розривом дуги на правій кромці різку, неперпендикулярність цієї кромки на 20...25 % менша ніж лівої. При

зварюванні правих кромek навіть на підвищених швидкостях пори не утворюються.

Уперше теоретично і експериментально встановлено граничні концентрації водяної пари в плазмі (9,5...19,2 %): нижня границя обумовлена попередженням пор, викликаних азотом, верхня - воднем.

Визначено, що при ППРДВ супутнє охолодження кромek різy, водою зменшує зону термічного впливу з 0,6 мм до 0,46 мм, а газова фаза сприяє зменшенню мікротвердості металу з 7840...8610 МПа до 3450...3660 МПа. Шорсткість поверхні різy відповідає першому класові Держстандарту. Деформації деталей практично відсутні. Границя втомленості плоских зразків, виготовлених ППРДВ, на 33 % вища, ніж при ацетилено-кисневому різанні.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується ретельним аналізом наукових праць в даній галузі. Достовірність результатів досліджень забезпечується коректністю застосованих методик, задовільним узгодженням результатів розв'язання тестових задач та теоретичних і експериментальних досліджень, прийнятою точністю експериментальних даних, їх математико-статистичною обробкою, а також результатами впровадження розробок у виробництво.

Наукове значення роботи полягає у розкритті механізму впливу повітряно-водяної плазми на якість поверхні різy, у тому числі властивості, перпендикулярність кромek та якість зварного шва при автоматичному зварюванні під флюсом вирізаних деталей.

Практичне значення отриманих результатів полягає у визначенні умов і режимів ППРДВ, розробці технології та нормативної документації на виготовлення суднокорпусних деталей із листового прокату, впровадженні результатів роботи у виробництво.

Впровадження результатів дисертації. Основні результати роботи впроваджено у ВАТ "Херсонський суднобудівний завод", ГВСП "Металосервіс", НВП "Укртермаш". Річний економічний ефект по

ВАТ "Херсонський суднобудівний завод", при побудові танкерів проекту 15966 складає 155,2 тисяч гривень.

Результати досліджень впроваджено в навчальний процес Національного університету кораблебудування (НУК) та Херсонської філії НУК.

Особистий внесок автора полягає у моделюванні складу повітряної плазми з додаванням води при плазмовому різанні, розробці установки для експериментального дослідження продуктів гартування плазми, розподілу води в плазмі і витрат води, аналізі отриманих результатів. Під керівництвом та при безпосередній участі автора розроблено методики та проведено експериментальні дослідження впливу плазмовоутворюючого середовища і технологічних параметрів на якість кромek різy, структуру та властивості металу, а також утворення пор при зварюванні. Автором розроблено систему водозабезпечення виробничої ділянки та нормативну документацію на виготовлення судно-корпусних деталей, впроваджено ППРДВ у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародній конференції "Кораблебудування: освіта, наука, виробництво" (м. Миколаїв, 2002 р.), Міжнародній науково-технічній конференції "Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства" (г. Николаев, 2003 г.), науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу НУК (м. Миколаїв, 2004 р.), Другій міжнародній конференції "Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах" (пос. Кацивели, Крым, 2004 г.). Регіональній науково-практичній конференції "Сварочное производство и технический прогресс" (г. Николаев, 2004 г.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових робіт, серед яких 8 у фахових виданнях, 1 в працях міжнародної конференції та 5 у збірниках матеріалів і тез доповідей різних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаної літератури з 156 найменувань та додатку. Робота має загальний обсяг 192 сторінки, включаючи 31 таблицю та 66 рисунків.

Основний зміст роботи

Вступ містить обґрунтування актуальності роботи, формулювання мети і задач дослідження, наукових результатів і їх практичного значення, відомості про зв'язок роботи з науковими темами та особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану технології виготовлення деталей корпусу судна. Розглянуто методи побудови та види виробництв на суднобудівному заводі. Показано, що основним способом виготовлення деталей є повітряно-плазмове різання, якість якого визначається за чотирма показниками: допуск на розмір, перпендикулярність кромки різа, шорсткість поверхні та глибина зони термічного впливу.

На основі аналізу літератури та виробничого досвіду на Херсонському суднобудівному заводі автором відзначено вади ППР. При ППР спостерігається значне відхилення від перпендикулярності кромки різку (2,3...2,5 мм), що суттєво впливає на продуктивність зварювання, витрати зварювальних матеріалів та якість судових конструкцій. ППР викликає насичення кромки різку азотом, що призводить до утворення пор при зварюванні товщин до 12 мм, які складають біля 50 % при побудові суден. Розглянуто заходи щодо усунення вад ППР та їх недоліки.

У підсумку сформульовано мету і задачі роботи.

У **другому розділі** наведено дані про досліджувані матеріали, описано методи досліджень, обладнання, прилади. При плазмовому різанні з додаванням води в плазмовий струмінь утворюється газова система, в якій протікають плазмо-хімічні процеси. Для експериментального визначення продуктів синтезу автором розроблено і виготовлено установку, схему якої показано на рис. 1.

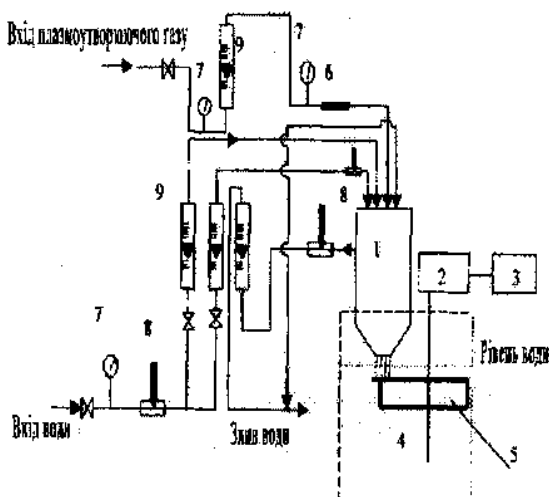


Рис. 1 Схема установки для експериментального визначення кількості води, що приймає участь у плазмо-хімічних реакціях, теплових потоків та продуктів синтезу з'єднань азоту: 1 – плазматрон ПМР-74; 2 – редуктор; 3 – двигун Д-90; 4 – гартівний пристрій; 5 – рухомий анод; 6 – осушувач повітря; 7 – манометр; 8 – термометр; 9 – ротаметр

Для гартування плазми в установці застосовується вода, що закриває рухомий анод. Вода гартівного середовища підлягає хімічному аналізу для визначення з'єднань азоту і водню.

Плазмове різання сталі виконували на машині "Кристал ТПл-2,5" плазмотроном ПРМ-74 з гафнієвим катодом і зміненою конструкцією соплового вузла для подачі води.

У роботі використовували профілометр-профілограф моделі 252, оптичний мікроскоп NEOFOT-21, растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЕММА-102, мікротвердомір ПМТ-3, установку для випробувань на втомленість, сучасні вимірювальні газова апаратура,

осцилографи й інші прилади для вимірювання електричних характеристик плазмової дуги.

У якості плазмоутворюючого середовища застосовувався азот, стиснене повітря, кисень, азот + вода, повітря + вода, кисень + вода, повітря + пропан-бутан.

Зварювання пластин виконувалося автоматом під шаром флюсу з лицевої сторони одним швом на постійному струмі зворотної полярності. У поздовжньому зламі шва визначалися розміри, кількість і загальна площа пор ($F_{\text{пор}}, \text{мм}^2$) і площа провару ($F_{\text{пр}}, \text{см}^2$). Відношення $\frac{F_{\text{пор}}}{F_{\text{пр}}}$ було критерієм для порівняльної оцінки пороутворення.

Третій розділ присвячено моделюванню складу газової фази при плазмовому різанні. Для умов плазмового різання було використано математичну модель, розроблену професорами Романовським Г.Ф. і Сербініним С.І.

Рівняння збереження компонентів та енергії для прийнятої моделі використовували у вигляді (1), (2) та в диференціальній формі:

$$G(Y_i - Y_i^{\text{in}}) - \omega_i \cdot M_i \cdot V = 0; \quad (1)$$

$$G \sum_{i=1}^I (Y_i \cdot h_i - Y_i^{\text{in}} \cdot h_i^{\text{in}}) - Q = 0, \quad (2)$$

де G – масові витрати компонента; Y_i – масова частка компонента i на виході; ω_i – швидкість утворення компонента i в одиниці об'єму; M_i – молекулярна маса компонента; V – об'єм реактора; I – загальна

кількість компонентів; h_i – ентальпія компонентів; Q – тепловий потік до реактора. Індекс in відповідає умовам на вході реактора.

У диференціальній формі балансові рівняння мають вигляд для утворення і розкладання хімічних компонентів

$$\frac{dY_i}{dt} = -\frac{1}{t_r} (Y_i - Y_i^{\text{in}}) + \frac{\omega_i M_i}{\rho}; \quad (4)$$

енергетичного балансу плазмохімічного і гомогенного реактора

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{1}{t_r} \sum_{i=1}^I (Y_i h_i - Y_i^{\text{in}} h_i^{\text{in}}) + \frac{Q}{\rho V} \quad (5)$$

де t_r – час перебування в реакторі.

Система рівнянь розв'язувалась за допомогою стандартної процедури **STANJAN**.

Для розрахунку процесів в проточному реакторі при гартуванні плазми приймалось, що реакції проходять у закритій системі з постійною масою суміші, тобто рівняння матеріального балансу компонентів і збереження енергії записуються у вигляді

$$\frac{dY_i}{dt} = \omega_i M_i, \quad (6)$$

$$C_p \frac{dT}{dt} + v \sum_{i=1}^I h_i \omega_i M_i = 0, \quad (7)$$

де v – питомий об'єм.

Для вирішення системи диференціальних рівнянь (6), (7) застосовувалась стандартна процедура **DASAC**.

Рішенням системи рівнянь є температура та мольні долі компонентів. Розрахунки виконані для систем: повітря, повітря + метан, повітря + водяна пара. Перші дві системи розглянуто для перевірки адекватності прийнятої математичної моделі шляхом порівняння отриманих результатів з результатами, наведеними в роботах Пархоменко В.Д., Полака Л.С.,

Ганза С.Н., та інших. Отримані результати розрахунків близькі до наведених в літературі.

Моделювання складу газової фази при ГШРДВ проводили при зміні долі водяної пари від 0,09 до 0,52 у повітряно-паровій суміші. Встановлено вплив температури на концентрації основних компонентів газової фази.

Важливе значення для утворення пір при зварюванні має вплив додавання води до повітря на зміну парціальних тисків азоту і водню в плазмі. Вплив температури на ступінь конверсії молекулярного азоту в плазмі показано на рис.2. Під ступенем конверсії азоту F_{N_2} розуміють

$$F_{N_2} = 1 - \frac{X_{N_2}}{X_{N_2}^0}$$

де $X_{N_2}^0$ та X_{N_2} - мольні та молекулярні долі азоту в початковій суміші, яка подається в плазмовий пальник, та в плазмохімічній системі в стані рівноваги відповідно.

Таким чином ступінь конверсії відображає ступінь дисоціації та зв'язування азоту в плазмі.

Результати розрахунку задовільно узгоджуються з літературними даними, у тому числі з експериментальними, що дозволяє обґрунтувати припущення про застосовність розрахункової моделі для аналізу складу газової фази при плазмовому різанні.

Моделювання взаємодії води, що потрапляє в сопло плазмотрона, зведено до газофазних реакцій іонізованого повітря з водяною парою. Число даних компонентів складає 24: $HOONO$, H , O , OH , HO_2 , H_2O_2 , NH_2 , NH , HNO , NNH , N , NOO , $HNNO$, $OSJNGL$, $HONO$, N_2O , NH_3 , H_2 , NO_2 , NO , H_2O , AR , O_2 , N_2 .

Досліджено залежність мольних часток стабільних продуктів і проміжних з'єднань від температури в умовах термодинамічної рівноваги повітряно-парової плазми при різних частках водяної пари в суміші з повітряною плазмою. З позиції утворення пор найбільшого значення мають концентрації азоту і водню. Вплив водяної пари на ступінь конверсії азоту та парціальні тиски азоту і водню показано на рис.2...рис.4.

З наведених рисунків видно, що при додаванні водяної пари з підвищенням температури ступінь конверсії молекулярного азоту зростає, а його парціальний тиск зменшується.

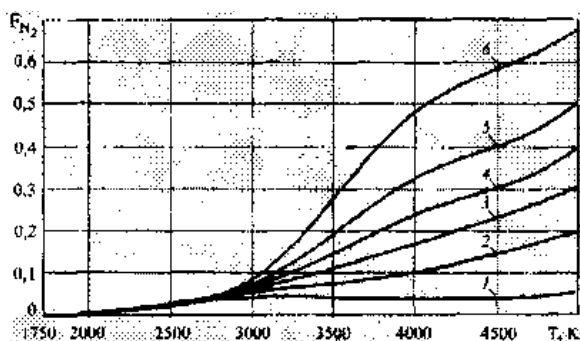


Рис.2 Залежність від температури ступеня конверсії азоту при різних мольних частинах водяної пари в повітряній плазмі: 1- $H_2O = 0$; 2 - 0,01; 3 - 0,17; 4 - 0,25; 5 - 0,35; 6 - 0,50

Вплив температури на парціальні тиски азоту і водню при різних долях водяної пари в плазмі показано на рис.3, рис.4.

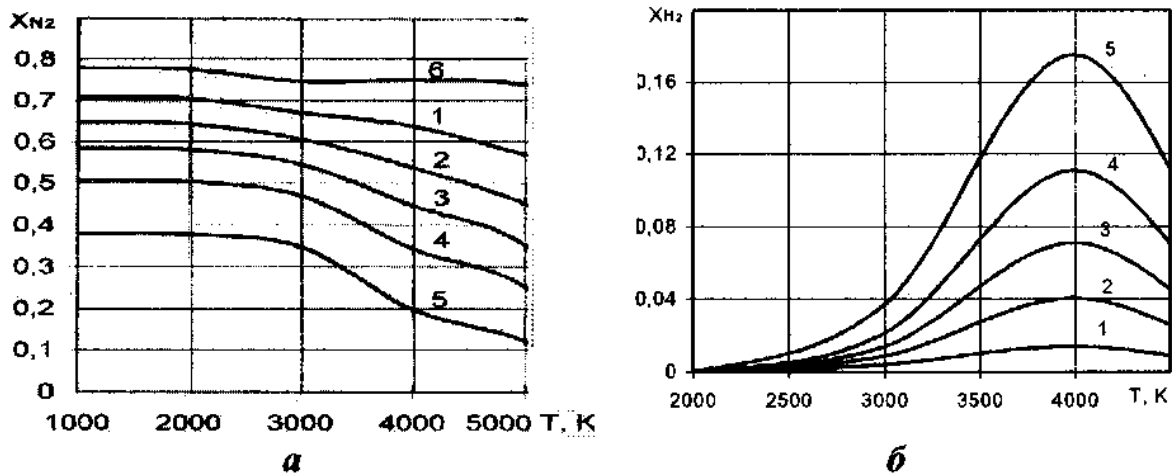


Рис.3 Залежність від температури концентрацій (мольної частки) молекулярних азоту (а) і водню (б) при різній кількості водяної пари в плазмі: 1 – $H_2O = 0,09$; 2 – 0,17; 3 – 0,25; 4 – 0,35; 5 – 0,52; 6 – 0

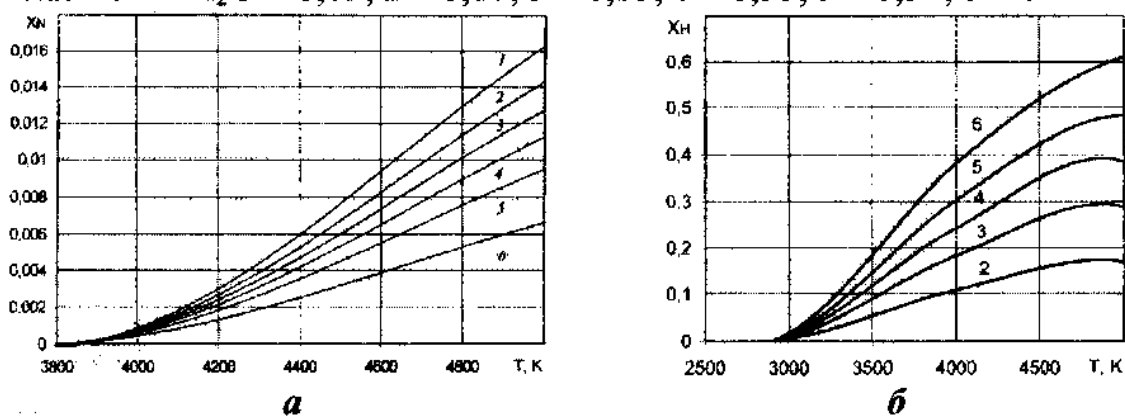


Рис.4 Залежність від температури концентрацій атомарних азоту (а) і водню (б) при додаванні до повітряної плазми різної кількості водяної пари: 1 – $H_2O = 0$; 2 – 0,01; 3 – 0,17; 4 – 0,25; 5 – 0,35; 6 – 0,50

Зменшенню парціального тиску молекулярного азоту сприяють утворення нових газів, дисоціація та зв'язування азоту в плазмі, про що свідчить зменшення парціального тиску атомарного азоту у всьому температурному інтервалі при додаванні води. З'єднаннями азоту можуть бути NO, NOO, HNNO та інші, інтенсивність утворення яких залежить від температури. Додавання води до повітряної плазми сприяє утворенню воднево-азотних сполук, про що свідчать як результати розрахунків гартування плазми, так і результати експерименту. З додаванням в плазму води вихід продуктів гартування збільшується в 1,7...2,4 рази. Експериментальні результати добре погоджуються з розрахунковими.

При ППРДВ зі збільшенням витрат водяної пари концентрації молекулярного і атомарного водню зростають, досягаючи максимальних значень при 4000 K для молекулярного та при 5000 K для атомарного водню. Відомо, що водень підвищує напруженість електричного поля та енергетичні характеристики плазмової дуги, що повинно позитивно впливати на якість різання. Водень також уповільнює розчинення азоту в сталі. За передбаченнями доля водяної пари в плазмі повинна складати до 0,2.

Моделювання складу газової фази при плазмовому різанні свідчить про можливість ефективного регулювання процесів при ППРДВ.

Експериментально встановлено, що в плазмохімічних реакціях приймає участь лише 9,5... 12,6 % води, що подається в плазму. Решта може сприяти обтисненню плазмової дуги і підвищенню її енергетичних характеристик.

Оскільки зі збільшенням кількості води в плазмі різко зростає концентрація водню, то для попередження пор, викликаних воднем при зварюванні, необхідно проведення прямих досліджень утворення пор та впливу води на якість різання.

У четвертому розділі розглянуто якість плазмового різання суднокорпусних сталей та вплив на нього технологічних факторів і плазмоутворюючого середовища. Аналіз якості ППР показав, що найбільшими вадами є непаралельність і неперпендикулярність до площини листа кромки різання та їх несиметричність. Середнє значення неперпендикулярності кромки при ППР складає 1,5...2,5 мм на кожну сторону, що відповідає лише третьому класу за ГОСТ 14792-80. Установлено фактори, що впливають на неперпендикулярність кромки різання, серед яких найбільший вплив має швидкість різання. При зменшенні швидкості ППР неперпендикулярність кромки зменшується, але це зменшує продуктивність виробництва.

Додавання до повітряної плазми води дозволяє зменшити неперпендикулярність кромки і зберегти високу продуктивність, не дивлячись на однаковий характер впливу швидкості різання. Ефективність впливу води зберігається при зміні витрат води в плазму від 0,023 до 0,11 л/хв.

ППРДВ суттєво зменшує неперпендикулярність кромки та шорсткість їх поверхні. Це пояснюється як присутністю в плазмі водню, так і тим, що вода обтискує й ущільнює струмінь плазми в каналі сопла, забезпечуючи більш високі енергетичні характеристики. При постійному

струмі за рахунок обтиснення дуги його щільність збільшується, про що свідчить зменшення на верхній кромці ширини різку в 1,3... 1,7 рази, напруга зростає на 25...30 В порівняно з ППР. Проникна здатність плазми помітно зростає, зменшуючи неперпендикулярність кромки різання до 0,5 мм на сторону. Поверхня різання має сріблястий колір і малу шорсткість ($R_z = 0,02...0,01$ мм проти $R_z = 0,12...0,09$ мм при ППР). Неперпендикулярність кромки відповідає другому класові за ГОСТ 14792-80.

Результати досліджень показали, що якість ППРДВ лівої і правої кромки залежить від напрямку обертання плазмового потоку. Неперпендикулярність кромки, на яку набігає газовий потік при вихровій стабілізації катодної плями, на 20...25 % більша, що слід враховувати при розробці схеми вирізання деталей.

Установлено вплив швидкості різання та складу і витрат плазмоутворюючого середовища на частоту пульсації дуги. Зміна частоти пульсації дуги пов'язана з глибиною занурення анодної плями по глибині різку та впливає на відхилення кромки від перпендикулярності. Зміна витрат води в наведеному вище інтервалі мало впливає на неперпендикулярність кромки різку. Натомість збільшення витрат плазмоутворюючого повітря від 0,83 до 2,0 л/с зменшує неперпендикулярність кромки у 1,6...2,3 рази.

Металографічні дослідження виконувалися на кромках пластин при різних способах різання. В усіх випадках плазмового різання встановлено збільшення мікротвердості тонкого приповерхневого прошарку металу порівняно з мікротвердістю ЗТВ і основного металу. Найвища мікротвердість приповерхневого прошарку (6500...8600 МПа) спостерігається при повітряно-плазмовому різанні, коли утворюється суцільний білий твердий прошарок, насичений азотом глибиною до 0,03 мм. При повітряно-паровій та киснево-паровій плазмі білий прошарок відсутній, нітрідів на поверхні кромки не виявлено. Азот у металі кромки знаходиться в стані пересиченого розчину. При ППРДВ має місце незначне збільшення мікротвердості і вузька ЗТВ (до 0,46 мм) порівняно з ППР (до 0,6 мм). Найбільшу зону термічного впливу дає ацетилено-кисневе різання (1,2...2 мм).

При ППРДВ деформації деталей практично відсутні.

Стан поверхні кромки різання має важливе значення для вирізаних деталей із вільними кромками, оскільки може позначатися при циклічному навантаженні. Порівняльні випробування плоских зразків на знакозмінний вигин на базі 10^7 циклів показали, що зразки, вирізані ППРДВ, мають опір втомі вищий на 33 %, ніж зразки, вирізані газокисневим різанням.

П'ятий розділ присвячено дослідженню пороутворення при зварюванні суднокорпусних деталей, виготовлених шляхом плазмового різання.

Для дослідження впливу плазмоутворюючого середовища при різанні на стійкість металу шва проти пор вибрано режим зварювання, який забезпечував найбільшу кількість пор. В якості плазмоутворюючого середовища застосовували повітря, кисень, азот, повітря + вода, кисень + вода та азот + вода.

Установлено, що найбільша кількість пор у зварних швах утворюється після азотно-плазмового різання. Додавання невеликої кількості води (витрата води 3-Ю"³ л/с) зменшує кількість пор у 2,1 рази, що стає майже однаковим з повітряно-плазмовим різанням. Додавання води до повітряної плазми зменшує кількість пор у 3,3 рази.

При ППР, як відзначали раніше, утворюється приповерхневий азотований прошарок товщиною біля 0,03 мм. Мала товщина прошарку підтверджується тим, що механічна обробка кромки на 0,1 мм зменшує кількість пор у 5,6 рази.

Насичення азотом металу кромки різку по товщині є нерівномірним, що підтверджується різанням пакета із трьох листів товщиною 8 мм і наступним зварюванням між собою окремо верхніх, середніх, і нижніх пластин. Найбільшу кількість пор виявлено при зварюванні нижніх пластин, найменшу - верхніх (меншу у 3 рази).

Дослідження впливу витрат води при повітряно-плазмовому та киснево-плазмовому різанні на утворення пор виконувалися при зміні витрат у межах $(1,6...8,3) \cdot 10^3$ л/с. Результати досліджень показано на рис. 5.

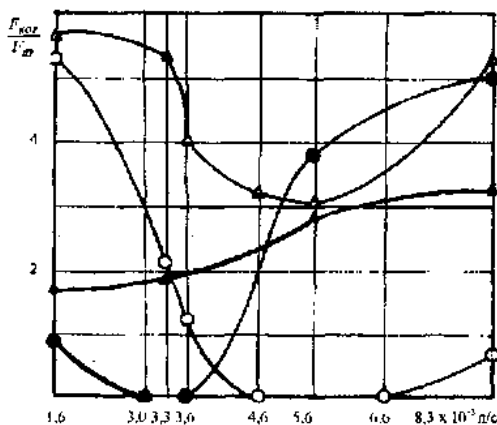


Рис.5 Вплив витрат води при плазмовому різанні на утворення пор при зварюванні правих (1, 2) і лівих (3, 4) кромки при плазмоутворюючому середовищі: ○, △ – повітря + вода; ●, ▲ – кисень + вода

Найбільшу кількість пор виявлено при зварюванні пластин, складених лівими кромками. Більш значне насичення азотом лівої кромки (більша товщина азотованого прошарку) пов'язано з напрямком обертання плазмового потоку (за часовою стрілкою). Найменша кількість пор у швах після плазмового різання спостерігається при витраті води $(4,28...6,4) \cdot 10^{-3}$ л/с.

При зварюванні правих кромки різку пори відсутні. Тому в розробленій нами нормативній документації передбачено врахування цього при складанні карт розкрою.

Визначено також інші параметри режиму різання.

У шостому розділі наведено технологічний маршрут виготовлення листових суднокорпусних деталей методом ППРДВ, починаючи з первинної обробки металу і закінчуючи комплектацією деталей. Показано схему вирізки деталей з листового прокату. Обґрунтовано режими ППРДВ деталей товщиною від 3 до 28 мм. Розглянуто водозабезпечення машин при виконанні ППРДВ. Показано дільницю ППРДВ у ВАТ „ХСЗ”. Результати досліджень та накопичений досвід дозволили автору розробити і впровадити на виробництві стандарт підприємства СТП 140-097-04 „Теплове різання металів. Типові технологічні процеси”.

Річний економічний ефект від впровадження розробок ППРДВ при побудові 5 корпусів танкера проекту 15966 склав 155,2 тисячі гривень.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі представлено теоретичне та експериментальне обґрунтування технології виготовлення листових суднокорпусних деталей методом ППРДВ.

2. Для опису процесів, що протікають у плазмі при різанні, використано кінетичну схему, що включає 258 реакцій з 58 компонентами. Термодинамічні характеристики та константи швидкостей реакцій достовірні при температурах 5000...6000 К. Порівняння результатів розрахунків, експериментальних даних інших авторів та результатів гартування плазми підтверджують адекватність моделі.

3. Моделювання складу газової фази при ППРДВ показало, що додавання води в плазму є ефективним засобом регулювання в ній парціальних тисків газів, зокрема азоту і водню, та підвищення енергетичних характеристик дуги.

4. Основними факторами позитивного впливу води в повітряній плазмі на перпендикулярність кромок є утворення водню, додаткове обтиснення плазми, що сприяє заглибленню анодної плями по товщині листа.

5. Шорсткість поверхні різання при ППРДВ знижується з 120...90 мкм при ППР до 20...10 мкм при різанні з додаванням води, що відповідає першому класові поверхні за ГОСТ 14792-80. Опір втомі при циклічному навантаженні вирізаних зразків на 33 % більший, ніж при ацетиленокисневому різанні. Супутнє охолодження кромок різання призводить до зниження теплових деформацій. Відзначається зниження шуму на 15...20 дБ при ППРДВ, порівняно з ППР.

6. Пульсація дуги при ППРДВ і несиметричність теплового потоку відносно лінії різання впливають на неперпендикулярність і насичення азотом лівої і правої кромок, що необхідно враховувати при складанні схеми розкрою.

7. Насичення азотом кромок різі по товщині є нерівномірним. При різанні пакета пластин найбільша кількість пор утворюється при зварюванні нижніх пластин.

8. Уперше теоретично і практично встановлено необхідні концентрації водяної пари в плазмі та відповідні витрати води, що забезпечують перпендикулярність кромок різі площині листа згідно вимог другого класу ГОСТ 14792-80, та попередження пор при автоматичному зварюванні під флюсом вирізаних деталей товщиною до 12 мм.

9. Технологічний процес виготовлення листових суднокорпусних деталей методом ППРДВ впроваджено в ВАТ „ХСЗ”. Результати досліджень включено до стандарту підприємства СТП 140-097-04, Річний економічний ефект сплав 155,2 тисячі гривень.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сербии СИ., Голобородько Ж.Г., Квасницкий В.В., Матвиенко М.В., Буряков А.В. Моделирование состава газовой фазы при плазменной резке судокорпусных сталей // Автоматическая сварка, - 2004. -№8.-С.12-15.

2. Сербии СИ., Голобородько Ж.Г., Квасницкий В.В. Теоретические исследования состава газовой фазы при воздушно-плазменной обработке судокорпусных сталей // Збірник наукових праць УДМТУ. — Миколаїв: УДМТУ, 2002. - № 6 (384), - С.34^4.

3. Голобородько Ж.Г., Квасницкий В.В. Исследование возможностей уменьшения скоса кромок и повышения стойкости электродов при плазменной резке в окислительных средах // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002. - №4 (382), - С. 77-83.

4. Голобородько Ж.Г., Квасницкий В.В. Исследование плазменной резки в плазмообразующих средах с добавлением воды //Збірник наукових праць УДМТУ.-Миколаїв: УДМТУ ,2002.- № 5 (383),-С. 37-46.

5. Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В. Влияние плазмообразующей среды при резке на образование пор при сварке судокорпусных сталей // Збірник наукових праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ, 2002.-№ 3 (381).-С. 25-31.

6. Драган СВ. Квасницький В.В., Романчук Н.П., Солонищенко Ю.В., Голобородько Ж.Г. Технологические процессы сварки и резки в судостроении // Автоматическая сварка, - 2004. - № 8. - С.3-6.

7. Голобородько Ж.Г., Воробьев В.П. Термическая резка в ХСПО // Технология судостроения. - 1988. -№5. - С. 3-6.

8. Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В. Тубальцев А.Н. Структурные изменения металла в зоне термического влияния при плазменной резке судокорпусных сталей и их сопротивление усталостному разрушению //Збірник наукових праць УДМТУ.- Миколаїв: УДМТУ,2003.-№ 6 (392).- С. 39-47

9. Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В., Матвиенко М.В, Солонищенко Ю.В., Сербии СИ., Квасницький В.Ф. Моделирование состава газовой фазы при плазменной резке судокорпусных сталей и ее влияние на качество сварки / Под ред. проф. В.И. Махненко // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах : Тр. второй междунар. конф., пос. Кацивели, Крым, Украина. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2004. - С.66-70.

10.Голобородько Ж.Г. Квасницький В.В. Воздушно - плазменная резка судокорпусных сталей с добавлением воды // Кораблебудування: освіта, наука, виробництво: матер, міжнар. конф., УДМТУ, 2002. - Т2. -С 58-59.

11.Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В. Тубальцев А.Н. Влияние воздушно-плазменной резки с добавлением воды на структуру и сопротивление усталостному разрушению судокорпусных сталей //Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства: Тр. Междунар. научно-техн. конф., Николаев: УГМТУ, 2003.-С.55-56.

12.Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В., Матвиенко М.В., Солонищенко Ю.В., Сербии СИ., Квасницький В.Ф. Моделирование состава газовой фазы при плазменной резке судокорпусных сталей и ее влияние на качество сварки //Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Тез. второй между-нар. конф., пос. Кацивели, Крым, Украина. - Киев: ИЭС им. Е.О. Патона. - 2—4.-2004. - С.47-48.

13.Голобородько Ж.Г., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф., Сербии СИ., Матвиенко М.В., Солонищенко Ю. В. Влияние плазмообразующей среды на качество плазменной резки и сварки вырезанных деталей // Сварочное производство и технический прогресс: Тез. регион, научно-практич. Конф., Николаев: НУК. - 2004. - С.47-48.

14.Квасницький В.Ф., Севрюков В.В., Квасницький В.В., Голобородько Ж.Г., Романчик Н.П., Солонищенко Ю.В. Технология изготовления судокорпусных деталей из листового проката // Сварочное производство и технический прогресс: Тез. регион, научно-практич. конф., Николаев: НУК. - 2004. - С.46-47.

Авторська участь у загальних публікаціях полягає в наступному. В [1,2,9,12] виконано розрахунки складу газової фази при додаванні води в плазмоутворююче середовище. В [3] визначено залежність частоти пульсацій дуги від швидкостей різання, вплив різних технологічних факторів на перпендикулярність кромки різання. В [4] розроблено і виготовлено установку для експериментального дослідження продуктів гартування плазми та аналіз отриманих результатів. Визначено взаємозв'язок між пороутворенням в зварних швах і витратами води в плазмо утворююче середовище. В [5,8,13] досліджено структура кромки різання та її залежність від додавання води і вплив на якість зварювання, оброблено і узагальнено експериментальні дані. В [6,7] виконано аналіз дефектів при плазмовому

різанню і способів виготовлення деталей. В [14] визначено маршрути виготовлення деталей і вплив якості різання на продуктивність, якість і точність виготовлення зварних конструкцій.

АНОТАЦІЯ

Голобородько Ж.Г. Розробка технології виготовлення листових суднокорпусних деталей методом повітряно-плазмового різання з додаванням води. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.04 - Технологія суднобудування та судноремонту. - Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2004.

Дисертація присвячена розробці технології виготовлення деталей, які використовуються при побудові та модернізації суден, що забезпечує підвищення якості плазмового різання деталей та зварних суднових конструкцій. Розроблена технологія плазмового різання в плазмотворюючих середовищах з додаванням води дозволяє зменшити газонасичення кромок різання та непаралельності кромок.

Основні наукові результати роботи знайшли практичне застосування при побудові суден.

АННОТАЦИЯ

Голобородько Ж. Г. Разработка технологии изготовления листовых судокорпусных деталей методом воздушно-плазменной резки с добавлением воды. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.04. - "Технология судостроения и судоремонта". Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2004.

Диссертация посвящена актуальной задаче повышения качества изготовления судокорпусных деталей термической резкой, снижающей трудоёмкость последующих работ при сборке и сварке секций и узлов судна, объем наплавленного металла, а также повышающего усталостную прочность свободных кромок деталей.

В первой главе изучены методы постройки судов и изготовления деталей корпуса судна. Рассмотрены основные способы изготовления деталей термической резкой. Определены технические и экономические показатели кислородной, плазменной и лазерной резки.

Во второй главе приведены данные о свойствах исследуемых материалов, разработана специальная экспериментальная установка. Приводится краткая характеристика методик исследований в работе.

Глава три представляет собой теоретическое исследование состава газовой фазы в различных плазмообразующих средах. Проведено моделирование состава газовой фазы при плазменной резке путем решения системы дифференциальных уравнений химической кинетики с учетом механизма процесса и констант скоростей реакций, которые протекают в плазмохимической системе. Синтез термодинамически стабильных соединений азота приводит к снижению парциального давления азота в струе плазмы. Определено, что добавка водяного пара или углеводородов является действенным методом снижения содержания азота в плазменной среде, что приводит к снижению насыщенности кромок реза и повышает стойкость металла против образования пор при сварке. Теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными, подтверждая, таким образом, адекватность принятой модели.

В четвертой главе приведены данные по влиянию плазменной резки на качество кромок реза. Характер плавления металла при резке определяется интенсивностью теплового потока плазменной струи. Добавка воды в

плазменную струю позволяет повысить качество кромок реза. Вода обжимает и уплотняет струю плазмы в канале сопла, обеспечивая более высокие энергетические характеристики. Резка в среде воздух + вода обеспечивает второй класс точности на отклонения неперпендикулярности кромок реза по ГОСТ 14792-80, снижение шероховатости с 120 -90 мкм до 20-10 мкм, что соответствует первому классу шероховатости поверхности. Предел выносливости свободных, не подлежащих сварке, кромок реза увеличивается в 1,3 раза по сравнению с ацетилен-кислородной резкой.

Пятая глава представляет собой экспериментальную часть, посвященную исследованию порообразования при сварке судокорпусных деталей. Разработана физическая модель взаимодействия плазменной струи с кромками разрезаемого металла. Определено влияние технологических параметров при резке в различных плазмообразующих средах на порообразование в сварных швах.

В шестой главе приведена технология плазменной резки. Проведен анализ условий охлаждения, быстроизнашиваемых деталей плазмотрона, разработана система охлаждения обеспечивающая повышенную стабильность работы электрода и сопла а также общая система водоснабжения участка ВПРДВ.

Ключевые слова: плазма, плазмообразующая среда закалка, плазмохимические соединения, азотирование кромок, неперпендикулярность кромок реза, плазмотрон.

ABSTRACT

Goloborodko J. Development of the technology of hull details production using the method of air-plasma flame cutting with addition of water. -Manuscript.

Thesis submitted for the degree of the candidate of technical sciences (engineering) in the specialty 05.08.04.

The thesis is developed to the development of the technology of manufacturing details, which are used in ship assembly and modernization, improving the quality of plasma cutting of details and welded ship sections.

The suggested technology of plasma cutting in plasma generating environment with the addition of water allows to decrease gasing of cutting edges and their non-parallelity. The main results of the research have found their practical use in the construction of ships.

**Підписано до друку 02.06.05. Папір офсетний. Формат 60х84/16.
Гарнітура Тайме. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 0,7 . Обл.-вид. арк.
0,8 . Тираж 100 прим. Зам. № 165. Ціна договірна**

**Друкарня видавництва Національного університету
кораблебудування, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5**