

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ

ТКАЧ МИКОЛА ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 622.245

**ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ
З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ІМПУЛЬСНИМ ВАКУУМНИМ
ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ**

05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Чернов Борис Олександрович

доктор технічних наук, професор

Копей Богдан Володимирович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

завідувач кафедри морських нафтогазових технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Яким Роман Степанович

Дрогобицький державний педагогічний університет ім. Івана Франка,

професор кафедри машинознавства та основ технологій

кандидат технічних наук

Савик Василь Миколайович

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,

доцент кафедри обладнання нафтових і газових промислів

Захист відбудеться 15 вересня 2016 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 10 серпня 2016 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Л. Д. Пилипів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із основних напрямів розвитку нафтогазової галузі держави є підвищення рівнів видобутку вуглеводневої сировини. При бурінні і освоєнні нафтових і газових свердловин важливими елементами, які значною мірою визначають працездатність бурильних і обсадних труб, є замкові різьбові з'єднання (ЗРЗ). Експлуатаційні характеристики ЗРЗ бурильних труб, мають істотний вплив на технічні показники буріння і економічну ефективність будівництва свердловин.

Працездатність ЗРЗ бурильної колони (БК) є сьогодні сукупністю багатьох часткових проблем створення умов для забезпечення максимального використання їх потенційних можливостей. Одним із напрямків вирішення є застосування досягнень у галузі формування захисних зміцнених поверхневих шарів, які забезпечуються сучасними технологічними процесами і дозволяють із науковою обґрунтованістю та техніко-економічною цілеспрямованістю вирішувати питання на етапах проектування та виготовлення бурильних труб і підтримання високого рівня працездатності ЗРЗ БК у межах експлуатаційних навантажень.

Забезпечення працездатності ЗРЗ БК неможливе без встановлення закономірностей впливу технологічних процесів виготовлення та умов експлуатації на властивості конструкційного матеріалу. Тому, виходячи з реальних умов експлуатації ЗРЗ БК (по навантаженню та оточуючому середовищу), на етапах проектування та виготовлення бурильних труб необхідно технологічно забезпечити високий рівень заданих механічних властивостей поверхневому шару при встановлених значеннях параметрів функціонування. Також необхідно вирішити питання щодо удосконалення існуючих чи створення нових технологічних засобів, які забезпечать отримання зміцненого поверхневого шару у вигляді складної композиції з підвищеною працездатністю та вивчення зміни механічних властивостей ЗРЗ, які переважно залежать від конструкційних матеріалів, технологічних параметрів та експлуатаційних факторів процесу буріння свердловин.

Зараз при виготовленні бурильних труб використовують технологічні процеси зміцнення їх поверхневих шарів, але в деяких випадках ресурс зміцнених ними конструкційних елементів бурильних труб не відповідає сучасним технічним вимогам, а здебільшого залишається низьким. Внаслідок чого питання на етапах проектування, виготовлення та ремонту щодо зміцнення ЗРЗ БК, надання їм необхідного рівня характеристик міцності, корозійної стійкості та зносостійкості залишаються важливими й під час буріння свердловин нафтогазового комплексу. У той же час, спираючись на досягнення науки, можливості виробництва, а також досвід розвитку технологій зміцнення як в Україні, так і за кордоном, є можливість підвищення працездатності елементів БК шляхом застосування удосконалених технологічних процесів. Перспективним технологічним процесом, призначеним для зміцнення ЗРЗ БК за рахунок утворення високоякісних поверхневих шарів, є ВІПА. Особливістю його удосконалення є здійснення процесу зміцнення поверхневого шару шляхом дифузійного насичення азотом у газотермоциклічному режимі в умовах імпульсного струму. Формування зміцнених поверхневих шарів в імпульсному режимі ВГТЦПА має підвищену ефективність його використання.

Проте, не дивлячись на набутий досвід, є ряд невирішених питань, зокрема таких, як недостатній рівень науково-практичної бази щодо можливості зміцнення поверхневих шарів ЗРЗ ІВГТЦПА та вивчення технологічних процесів щодо здійснення протидії одночасному впливу динамічних навантажень та агресивного навколишнього середовища, які часто призводять до корозійно-втомних руйнувань конструктивних елементів БК, а відповідно до аварій і ускладнень, на ліквідацію яких витрачаються значні кошти. Крім цього, відсутній принцип керування технологічним процесом ІВГТЦПА на основі оптимізації технології за критеріями інтенсивності зношування, межі витривалості та корозійної стійкості, розв'язання яких спроможне забезпечити єдиний науково-обґрунтований підхід до їх системного дослідження та впровадження отриманих наукових результатів.

Таким чином, науковим завданням дисертаційних досліджень є розроблення комплексу науково-обґрунтованих технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу буріння свердловин шляхом зміцнення ЗРЗ БК удосконаленим методом ІВГТЦПА.

Положення, що захищаються. Встановлення закономірностей впливу технологічного процесу ІВГТЦПА на працездатність ЗРЗ БК.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм з розвитку нафтопромислового комплексу України і входить в план наукової та науково-технічної діяльності Івано-франківського національного технічного університету нафти і газу та виконувалася в межах науково-дослідної роботи “Розроблення інноваційних технологій освоєння родовищ природних вуглеводнів з низько проникними колекторами” (номер держреєстрації 0115U002281). Автором розроблено технологічні основи підвищення працездатності ЗРЗ БК шляхом створення зміцнюючих захисних поверхневих шарів, проведено комплекс експериментальних досліджень, а також розроблено принцип керування удосконаленим технологічним процесом ІВГТЦПА за показниками інтенсивності зношування, межі витривалості і корозійної стійкості та прогнозування властивостей “основа – зміцнений шар” на основі математичного моделювання.

Мета і завдання дослідження. Підвищення працездатності елементів бурильної колони удосконаленим методом імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування та встановлення закономірностей впливу його параметрів на їх втомну міцність, зносостійкість та корозійну стійкість.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

1. Удосконалити технологічний процес ВГТЦПА і встановити закономірності впливу його параметрів на механічні властивості елементів БК.
2. Провести експериментальні дослідження щодо визначення впливу механічних властивостей модифікованих поверхонь елементів БК на їх експлуатаційні характеристики.
3. Розробити математичні моделі та провести оптимізацію удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА, і на цій основі розробити науковий принцип управління ним за критеріями межі витривалості, корозійної стійкості та зносостійкості.
4. Розробити технологічні рекомендації щодо підвищення працездатності

елементів БК удосконаленим методом ІВГТЦПА.

Об'єкт дослідження – технологічний процес ІВГТЦПА ЗРЗ БК.

Предмет дослідження – працездатність зміцнених ЗРЗ БК.

Методи дослідження. Метод ІВГТЦПА – для формування зміцнених ЗРЗ БК. Метод багатofакторного планування експериментальних досліджень і математичної обробки статистичних даних – для визначення оптимальних параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА. Металографічні і рентгеноструктурні методи – для дослідження особливостей мікроструктури поверхневого шару, вмісту і розподілу зміцнювальних фаз у дифузійних поверхневих шарах ЗРЗ БК. Методи інженерної механіки – для дослідження шорсткості, мікротвердості, зносостійкості, корозійної стійкості та межі витривалості зміцнених ЗРЗ БК. Метод кінцево-елементного аналізу – для оцінки напружено-деформованого стану та визначення граничних напружень зміцнених ЗРЗ БК в умовах циклічного навантаження.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено закономірності впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА на працездатність ЗРЗ БК.

2. Удосконалено технологічний процес ВГТЦПА, який, на відміну від існуючих, здійснюється в газотермоциклічному режимі в умовах імпульсного струму, що дозволяє забезпечити підвищену концентрацію нітридних фаз для формування більш рівномірного і однорідного зміцненого шару, сприяє зниженню залишкових напружень у зміцненому поверхневому шарі.

3. Удосконалено модель дифузійного насичення поверхні деталі, яка, на відміну від існуючої, враховує вплив структури та додаткову дифузійну рухому силу, що зумовлено застосуванням газотермоциклічного режиму в умовах імпульсного струму.

4. Одержала подальший розвиток багатокритеріальна оптимізація удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА, яка базується на урахуванні зносостійкості, корозійної стійкості та втомної міцності зміцнених ЗРЗ БК та є способом управління працездатністю бурильних і обважнених труб бурових колон.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в роботі науково обґрунтовані результати формують рекомендації щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК, яка дозволить на етапах виробництва та ремонту бурильних труб здійснити синтез і вибір раціональних за складом та властивостями зміцнених поверхневих шарів. Це дозволить підвищити середній технічний ресурс до 2,5 разів.

Розроблено та захищено патентом України на корисну модель спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей з різьбовою поверхнею іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді (пат. № 91096 опубл. 25.06.2014, бюл. № 2.).

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень удосконалено технологічний процес формування зміцнених поверхонь ЗРЗ БК ІВГТЦПА, що забезпечило підвищення межі витривалості на 20–40% та підвищення корозійної стійкості і зносостійкості у 1,7–3,1 рази.

Технологію зміцнення елементів БК ІВГТЦПА доцільно використовувати при проектуванні та виробництві бурильних і обважнених бурильних труб (акт реалізації ПрАТ “Газінвест”).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові й теоретичні положення відпрацьовані автором самостійно. Без співавторів опубліковано статті – [5, 9]. Матеріали дисертаційної роботи не містять ідей або розробок, що належать співавторам. Так, в [1] – отримано оптимальні параметри технологічного процесу ІВГТЦПА; [2] – проведено аналіз впливу експлуатаційних факторів на працездатність бурових колон; [3] – оцінено стан проблеми підвищення довговічності замкових різьбових з'єднань бурильної колони ІВГТЦПА; [4] – проведено аналіз напружено-деформованого стану зміцненої сталі 40ХН методом ІВГТЦПА за допомогою кінцево-елементного аналізу з використанням програмного забезпечення NASTRAN; [5] – проведено вибір критеріїв оптимізації, керованих факторів, побудовано план експерименту та на основі результатів експериментальних досліджень отримано математичні моделі технологічного процесу ІВГТЦПА; [6] – наведено результати триботехнічних випробувань зміцнених поверхневих шарів ІВГТЦПА; [7] – проведено дослідження на корозійну стійкість зміцнених поверхневих шарів методом ІВГТЦПА та отримано математичну модель технологічного процесу; [8] – проведено дослідження на втому зміцнених поверхневих шарів методом ІВГТЦПА та отримано математичну модель технологічного процесу; [9] – обґрунтовано економічну ефективність технологічного процесу зміцнення замкових різьбових з'єднань ІВГТЦПА; [10] – показано перспективність використання методу ІВГТЦПА для зміцнення елементів бурильної колони; [11] – проведено аналіз впливу ІВГТЦПА на підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони; [12] – розкрито технологію ІВГТЦПА та показано її позитивний вплив на підвищення працездатності ЗРЗ БК; [13] – показано вплив ІВГТЦПА на підвищення корозійної стійкості, зносостійкості та границі витривалості ЗРЗ БК; [14] – проведено аналіз існуючих методів підвищення працездатності ЗРЗ БК та показано, що одним із перспективних методів є ІВГТЦПА; [15] – проведено дослідження на корозійну втому зміцнених ЗРЗ БК ІВГТЦПА та доведено позитивний вплив методу ІВГТЦПА на підвищення ресурсу ЗРЗ БК.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях та семінарах: Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів “Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012”, м. Івано-Франківськ, 2012 р.; Міжнародна науково-технічна конференція “Нафтогазова енергетика 2013”, м. Івано-Франківськ, 2013 р.; Міжнародна науково-технічна конференція “Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи”, присвячена 70-річчю нафтопромислового факультету, м. Івано-Франківськ, 2014 р.; 14-а міжнародна науково-технічна конференція “Инженерия поверхности и реновация изделий”, Крим, м. Ялта, 2014 р.; 14-й міжнародний науково-технічний семінар “Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте”, м. Свалява, 2014 р.; Міжнародна науково-технічна конференція “Машины, оборудование и материалы для наращивания вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу” ІІМ – 2016, м. Івано-Франківськ, 2016 р.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 9

наукових статтях провідних фахових наукових виданнях, затверджених ДАК України, із них 6 наукових статей опубліковано у наукових журналах, 2 наукові статті – у збірниках наукових праць, 1 – за кордоном. Додатково матеріали дисертації опубліковано в 6 тезах доповідей на науково-технічних конференціях та в 1 патенті України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5 розділів і 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 190 сторінок, 167 сторінки основного змісту, 91 рисунок, 17 таблиць, 211 використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми та розкрито суть наукового завдання, основні положення, що захищаються, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено об'єкт та предмет дослідження. Показана наукова новизна і практична цінність дисертаційних досліджень та особистий внесок дисертанта в розробку наукового завдання. Наведено відомості щодо апробації та реалізації досліджень, повноти їх викладення в публікаціях.

У першому розділі проведено аналіз сучасних поглядів на підвищення працездатності БК. Встановлено, що основними видами руйнування конструкційних елементів БК є руйнування від втоми, корозійного пошкодження та зношування. Аналіз статистичних даних свідчить, що з усіх бракованих деталей БК 45% складають ЗРЗ.

На основі аналізу існуючих методів поверхневого зміцнення замків БК та вимог до геометричних параметрів та механічних властивостей поверхневих шарів зміцнюваних деталей встановлено, що найбільш перспективним зараз є метод ВПА. Однак широкому впровадженню технологічного процесу вакуумного іонно-плазмового азотування заважають відсутність оптимальних параметрів поверхневого зміцнення методом ВПА та сучасного якісного обладнання для реалізації методу. Крім того, існуючі зараз підходи до організації технологічного процесу ВПА використовують лише окремі потенційні можливості підвищення його ефективності та не враховують реалізацію процесу в імпульсному газотермоциклічному режимі, тому в роботі пропонується використовувати удосконалений метод імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування (ІВГТЦПА)

У другому розділі обґрунтовано вибір напрямку дослідження та розроблено загальний підхід до виконання роботи, для всебічної комплексної оцінки властивостей поверхневих шарів на базі системного підходу до виконання роботи та для комплексної оцінки поверхневих шарів. Задача оптимізації технологічного процесу поверхневого зміцнення ЗРЗ БК за допомогою ІВГТЦПА розглядалася як багатфакторна та багатокритеріальна, план експерименту був побудований за допомогою пакета прикладних програм “Планування, регресія і аналіз моделей” (ППП ПРИАМ).

Для проведення випробувань на втому використовувалася високочастотна магнітострикційна установка. Основні умови роботи експериментального

обладнання полягають в тому, що робоча частота установки, при якій можливе її використання для випробувань на втому, лежить у межах $\sim 9,8\text{--}10,8$ кГц. Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися зразки призматичної форми зі сталі 40ХН. При дослідженні зразків на втому використовувалася база випробувань на втому $N=10^7$ циклів навантаження. Для порівняльного визначення опору втомі не зміцнених і зміцнених ІВГТЦПА сталевих зразків та побудови кривих втоми досліджували не менше 10–15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування.

Трибологічні характеристики зміцнених поверхневих шарів визначалися на машині тертя за умов максимально наближених до реальних експлуатаційних режимів роботи ЗРЗ БК: мастильне середовище – ЦИАТИМ-201; питоме навантаження – 2,5–25 МПа; швидкість ковзання – 0,4 та 1,0 м/с. Зміцнені зразки зі сталі 40ХН притискалися до термооброблених контртіл цієї ж сталі. Порівняльна оцінка зносостійкості сформованих поверхневих шарів здійснювалася за значеннями вагової інтенсивності зношування I_v [кг/см² на 1000 м шляху тертя].

Для оцінки корозійної стійкості проводили 10-годинні досліди плоских зразків в алундових тиглях при температурі нагрівання до 973 °К. Перед початком дослідів та через кожні 2 години витримування на поверхню зразків наносили сольову обмазку, яка складалася з Na₂SO₄ та NaCl (у співвідношенні 3:1). Порівняльну оцінку корозійної стійкості проводили за питомим збільшенням маси зразків у залежності від часу випробувань.

Для проведення втомних випробувань замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині використовувався стенд ЗКШ-25. Випробування проводилися на корозійну втому при консольному згині з обертанням частотою 15,2 Гц. Для випробувань замкових різьбових з'єднань використовували 3% розчин NaCl, пластову воду, нафтові емульсії. Для дослідження втомної стійкості було розроблено моделі замкового різьбового з'єднання 3-26, які виготовляли зі сталі групи міцності Д, і вони були геометрично подібні різьбі бурильних замків 3-42 (ГОСТ 7918-75) для геологорозвідувальних бурильних труб.

Визначення хімічного складу поверхні зразків проводилося на основі методики кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу. Знімання проводилося на “РЕММА-101А”. Мікроструктурний аналіз проводився з використанням оптичного мікроскопа “Neophot – 30” при збільшеннях $\times 50\text{--}500$. Рентгенофазовий аналіз проводився для уточнення фазового складу зразків. Дослідження проводились на дифрактометрі “Дрон-4-13С”. Рентгенографічний аналіз макронапружень виконувався на дифрактометрі “Дрон-4-13С”. Зйомка проводилась за методом Брега-Брентано.

При визначенні залишкових напружень проводилося прецизійне вимірювання параметрів кристалічної решітки і макронапружень на дифрактометрі “Дрон-4-13С”.

Для оцінки напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів використовувався метод кінцево-елементного аналізу. Для розрахунку використовувався програмний продукт NASTRAN. При створенні кінцево-елементної сітки зразків враховувалося, що найбільш густа сітка необхідна там, де деформації або напруження є ймовірно більшими.

У третьому розділі проведено вибір критеріїв оптимізації та керованих конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів, згенеровано план експеримента на основі ЛП_т-чисел з 16 варіантів дослідів. Удосконалено технологічний процес ІВГТЦПА та модель дифузійного насичення поверхневих шарів деталей азотом.

В якості критеріїв оптимізації технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару вибрано: зносостійкість зміцненого матеріалу, що характеризується інтенсивністю зношування (Y_1); корозійна стійкість зміцненого матеріалу, що характеризується питомим збільшенням маси зразків у залежності від часу випробувань (Y_2); границя витривалості при симетричному циклі (Y_3).

Як керовані фактори були внесені в план експерименту: час дифузійного насичення (X_1), тиск реакційного газу (X_2), склад реакційного газу (X_3), температура газу (X_4), величина температурного циклу (X_5) та експлуатаційне навантаження в умовах тертя (X_6).

На основі визначених 16 варіантів режимів технологічного процесу здійснювалося зміцнення та випробування зразків зі сталі 40ХН

Удосконалена технологія імпульсного ВГТЦПА поєднує переваги подавання на вхід вакуумної установки для азотування пульсуючого струму з високою напругою (до 1200 В) та періодичного чергування циклів насичення та розсмоктування азоту як за насичувальною здатністю атмосфери, так і за температурою. З цією метою у процесі дифузійного насичення циклічно припиняють подавання у вакуумну камеру реакційного газу з тривалістю напівциклу 15–30 хв. Температура насичення азотом та деазотації (розсмоктування) є різною, після нагрівання до 600 °С, не припиняючи електроживлення і надаючи можливість деталі знаходитися у плазмі тліючого розряду, охолоджують деталь (етап охолодження) до температури 400 °С протягом 0,5–1 години, після чого вимикають напругу і в середовищі робочого газу охолоджують до кімнатної температури, а потім виймають деталь з різбовою поверхнею із контейнера (рис. 1).

Удосконалена модель дифузійного насичення металу азотом, на відміну від існуючих, враховує вплив дефектів решітки та додаткову рушійну силу на якість утвореного зміненого шару, обумовлену застосуванням газотермоциклічного режиму та імпульсного струму:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{grain}} \cdot L_N}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[-\frac{C_D \langle V_x \rangle_F \cdot t}{4Dt} \right],$$

де L_N – товщина нітридної зони; $C_D \langle V_x \rangle_F \cdot t = x_{\text{ГТЦ}}$ – зміна глибини проникнення дифузанта, що залежить від дефектів кристалічної решітки та параметрів ІВГТЦПА.

При дослідженні мікротвердості зміцнених ІВГТЦПА поверхневих шарів виявили зростання її значень від 3500 до 10750 МПа на поверхні та поступове зменшення до 3500 МПа на глибину до 300 мкм, що характеризує мікротвердість основи.

Як показали мікроструктурні дослідження, карбонітрид може бути описаний формулою $\text{Cr}_2\text{C}_{0,6}\text{N}_{0,3}$ – трьохкомпонентне з'єднання типу твердого розчину з

широкою областю гомогенності. Пошаровий рентгенівський аналіз показав, що в приповерхневій зоні існує азотований шар, який складається з $\epsilon - (\text{Fe}_{2-3} \text{N})$ і $\gamma - (\text{Fe}_4 \text{N})$ – фаз. По мірі зрівнювання шарів залишаються нижні нітриди і тверді розчини з різною концентрацією азоту.

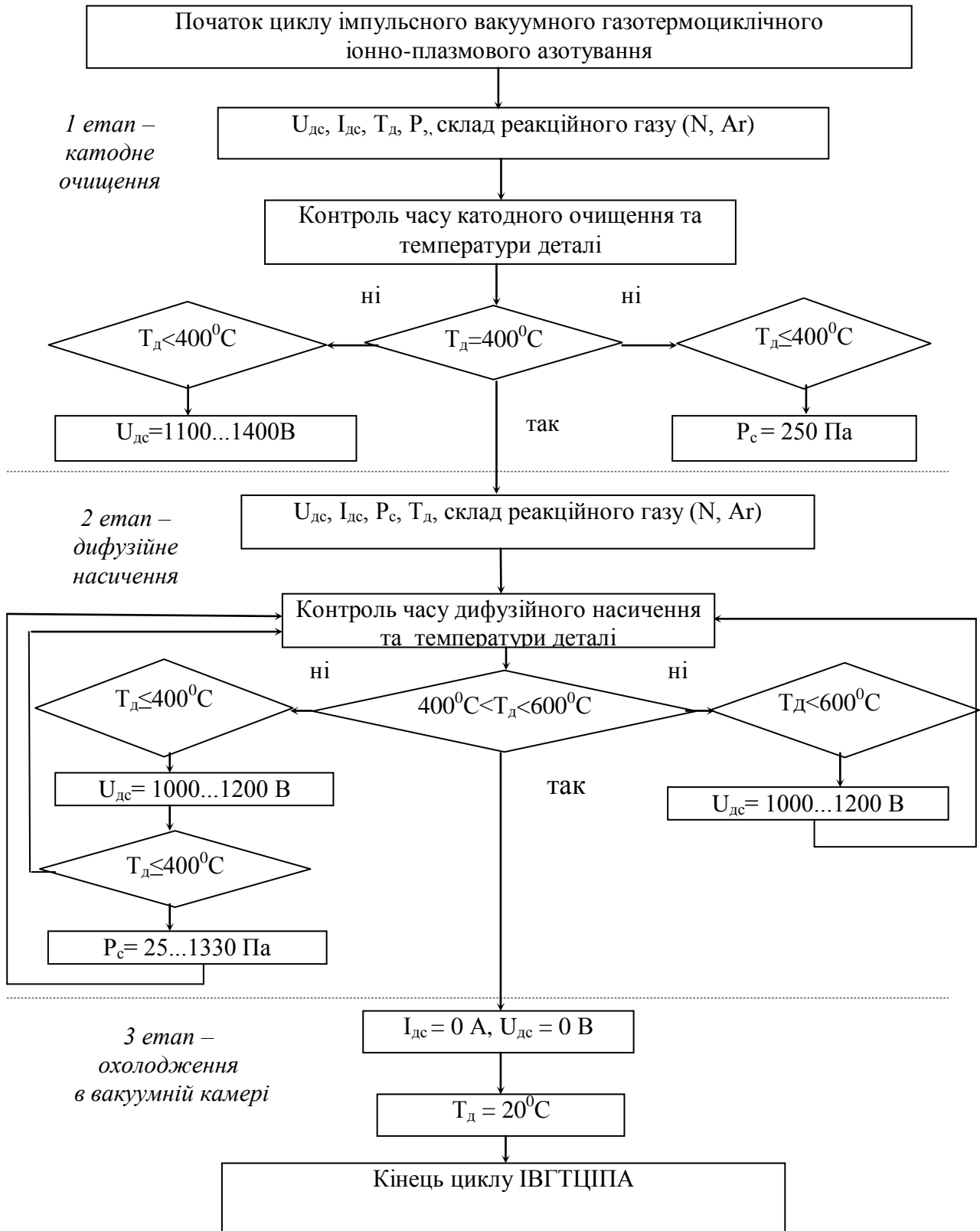


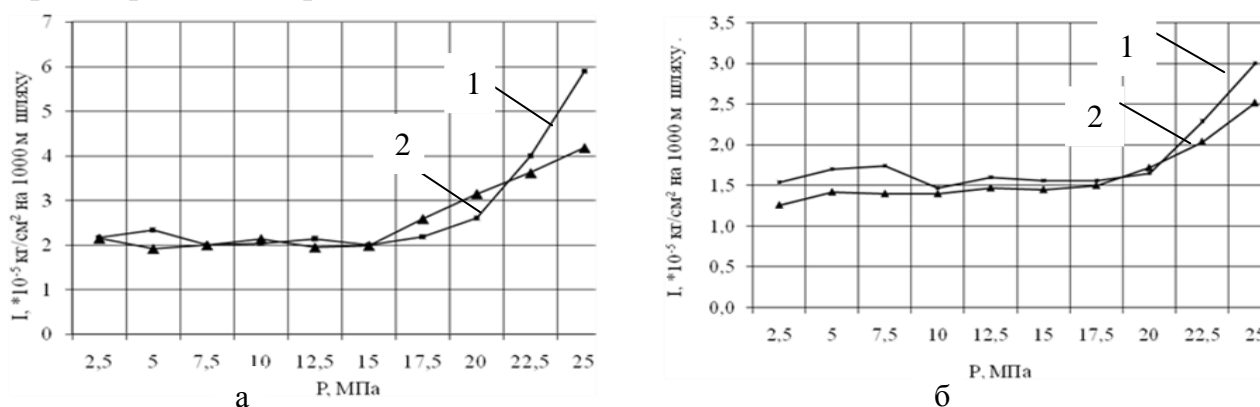
Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму процесу ІВГТЦПА

У результаті проведених досліджень залишкових напружень в зміцненому

поверхневому шарі встановлено, що значення величини залишкових напружень на поверхні деталі зменшується та залежить від умов попередньої термообробки і температури формування зміцненого поверхневого шару. Тобто, напруження стиску поступово зменшуються зі зміною по глибині і дорівнюють нулю там, де закінчується дифузійний шар.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень щодо оцінки закономірності впливу технологічного процесу ІВГТЦПА на інтенсивність зношування, корозійну стійкість та границю витривалості зразків із сталі 40ХН. Отримано математичні моделі технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару за критеріями інтенсивності зношування, питомого збільшення маси та границі витривалості. Отримані залежності перевірено на адекватність, відтворюваність та інформативність результатів за критеріями математичної статистики. Проведено порівняльну оцінку напружено-деформованого стану поверхні як без обробки поверхневого шару ІВГТЦПА, так і після формування зміцненого поверхневого шару.

У результаті проведення експериментальних досліджень поверхневих шарів зразків зі сталі 40ХН на зносостійкість, згідно з планом експерименту, встановлено (рис. 2), що значення інтенсивності зношування залежно від режимів технологічного процесу ІВГТЦПА менші у 1,8–2,2 рази порівняно з інтенсивністю зношування термооброблених зразків.



а – термооброблений зразок: 1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с; б – попередньо ТО та зміцнений ІВГТЦПА: 1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 2 – Залежність інтенсивності зношування від питомого навантаження P (МПа)

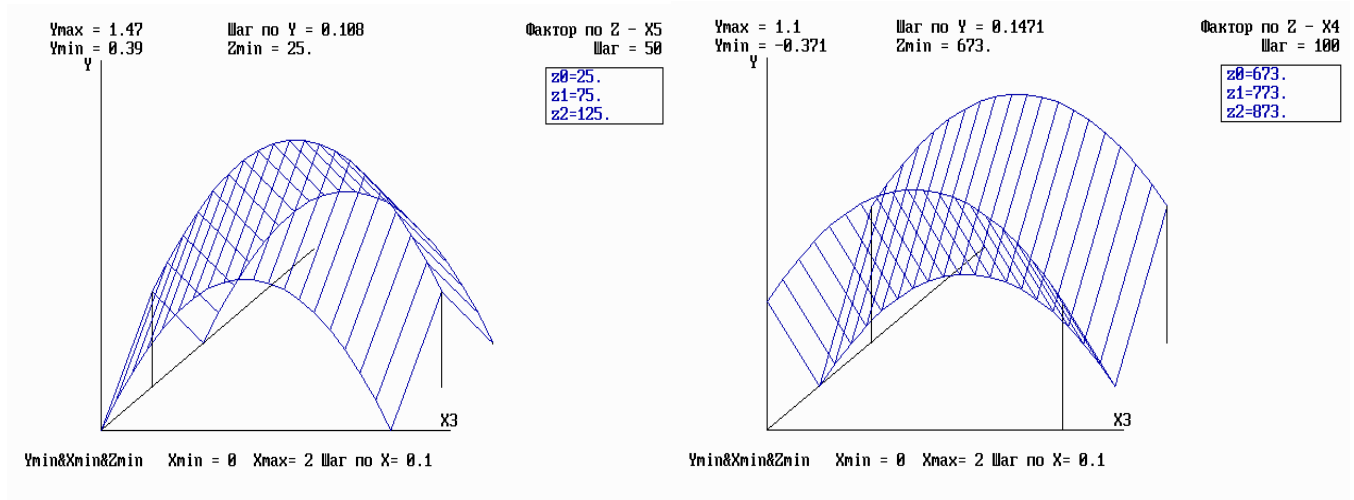
За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель:

$$Y_1 = 1,61058 + 0,494431x_1^2x_6^2 - 0,376419x_4^2x_6^3 - 0,273589x_4^2 - 0,281322x_3^2x_6^2 + 0,124359x_6^2 - 0,141168x_1^2x_5^2,$$

де Y_1 – математична модель в кодованих значеннях для інтенсивності зношування.

На основі отриманих результатів одержано геометричний образ функції відгуку Y_1 шляхом побудови відповідної геометричної поверхні (рис. 3). Проведено

аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначено значення факторів, яке під час експериментальних досліджень здійснює найбільший чи найменший вплив.



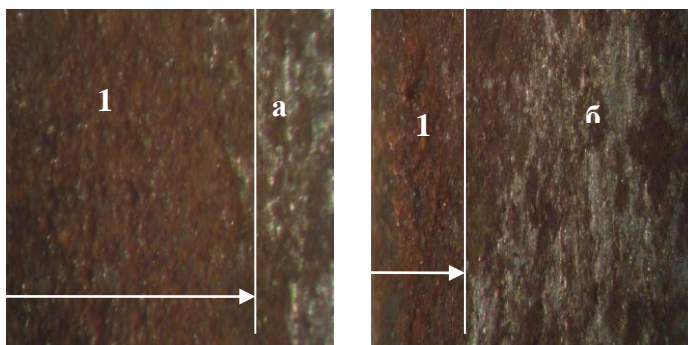
а)

б)

а) $Y_1 = f(X_3, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_4=673$ °К, $X_6=2,5$ МПа; б) $Y_1 = f(X_3, X_4)$ в тривимірному просторі при $X_4=673$ °К, $X_6=2,5$ МПа.

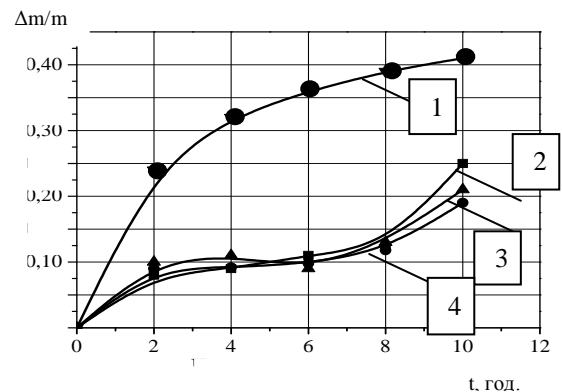
Рисунок 3 – Графік дослідження поверхні відгуку

В результаті проведення досліджень корозійної стійкості зразків зі сталі 40ХН після ІВГТЦПА встановлено, що завдяки впливу удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцнених поверхневих шарів відбувається її підвищення у 1,5–3 рази (в залежності від технологічних режимів обробки) (рис. 4, 5).



1) Зона корозійного ураження: а) без ІВГТЦПА та б) зміцненого ІВГТЦПА.

Рисунок 4 – Зміна величини зони корозійного пошкодження



1 – без зміцнення;

2 – ІВГТЦПА (90%Ar+10%N₂);

3 – ІВГТЦПА (75%Ar+20%N₂);

4 – ІВГТЦПА (60%Ar+40%N₂).

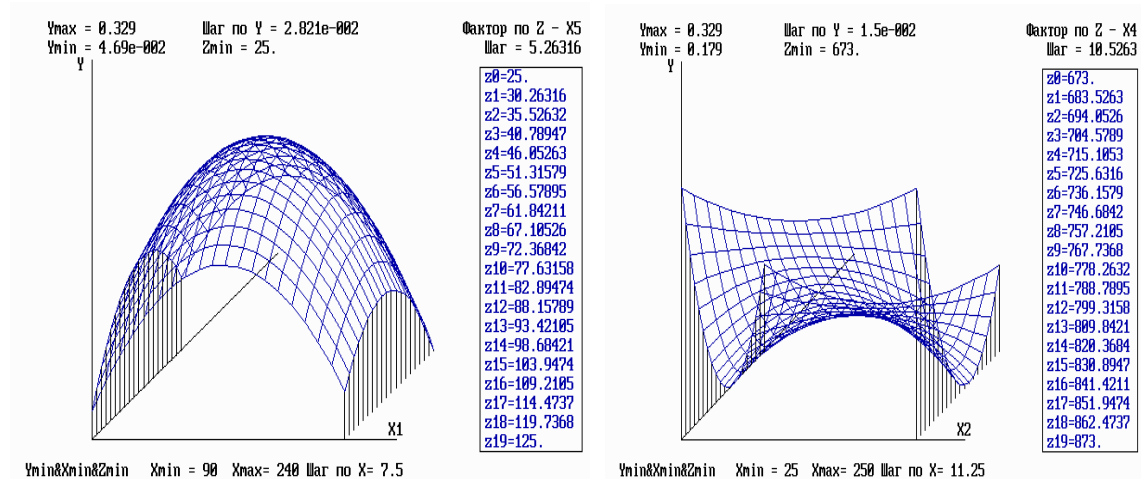
Рисунок 5 – Залежність питомого збільшення маси зразка від часу випробувань

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель:

$$Y_2 = 0,252985 + 0,0232932 x_2^2 x_4^2 - 0,01990961 x_3^2 - 0,02081 x_5^2 - 0,0212151 x_1 x_5 - 0,0921139 x_3^2 x_4^2 x_5^2 - 0,0908706 x_1^2 x_3 x_4,$$

де Y_2 – математична модель у кодованих значеннях для питомого збільшення маси зразка $\Delta m/m$.

На основі отриманих результатів одержано геометричний образ функції відгуку Y_2 шляхом побудови відповідної геометричної поверхні (рис. 6). Проведено аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначено значення факторів, яке під час експериментальних досліджень здійснює найбільший чи найменший вплив.



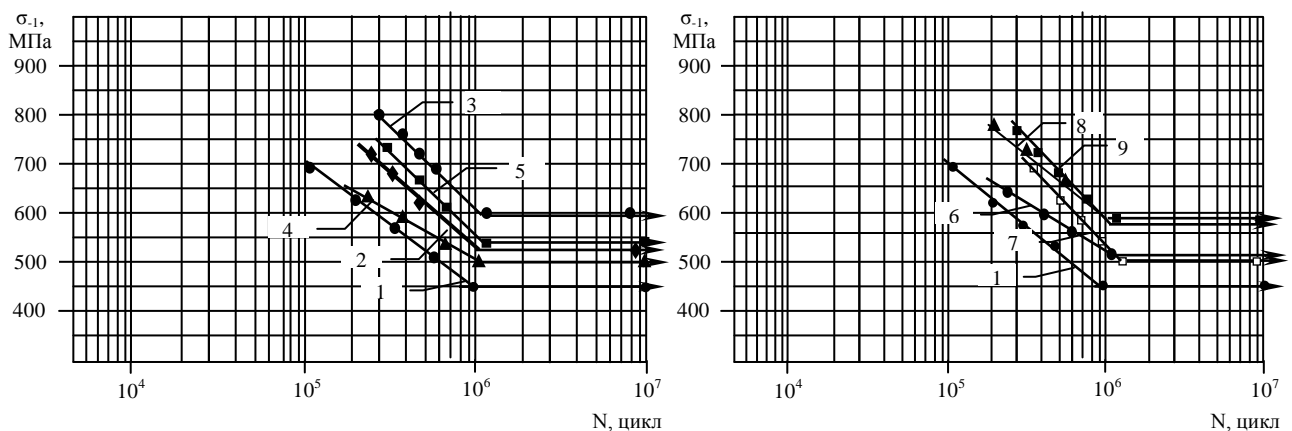
а

б

а) поверхня відгуку $Y_2 = f(X_1, X_5)$; б) поверхня відгуку $Y_2 = f(X_2, X_4)$.

Рисунок 6 – Графік дослідження поверхні відгуку

Випробування на втому зразків зі сталі 40ХН показали, що завдяки технологічному процесу ІВГТЦПА вдалося підвищити границю витривалості сталі на 15...20% зі збільшенням кількості циклів до руйнування. Усі варіанти формування зміцненого шару підвищують σ_{-1} (рис. 7).



1 – без зміцнення; 2-10 – із зміцненням згідно з планом експерименту.

Рисунок 7 – Приклад кривих втоми сталі 40ХН

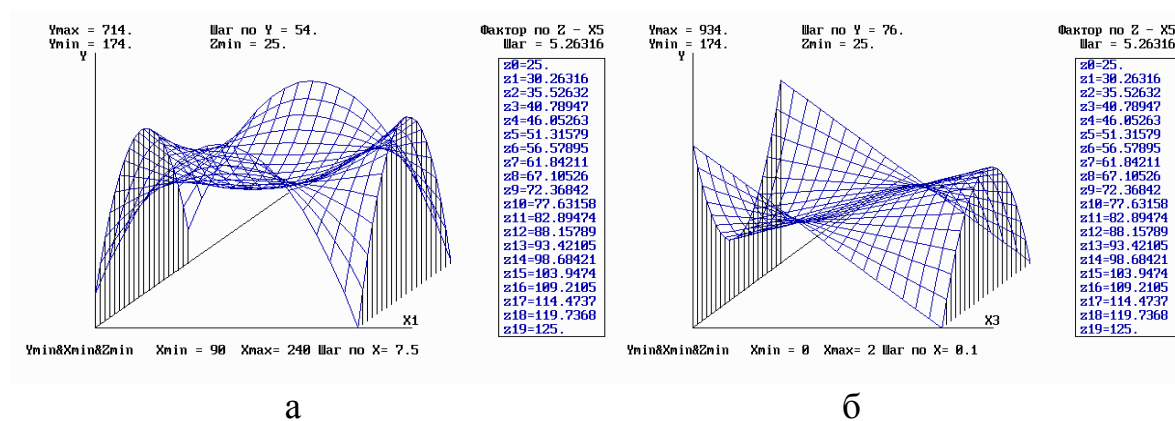
За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано

регресійну модель.

$$Y_3 = 554,961 + 321,398x_1^2 x_2^2 x_3 x_5^2 + 14,4129x_4 + 39,8087x_1 x_4 x_5,$$

де Y_3 – математична модель у кодованих значеннях для σ_{-1} .

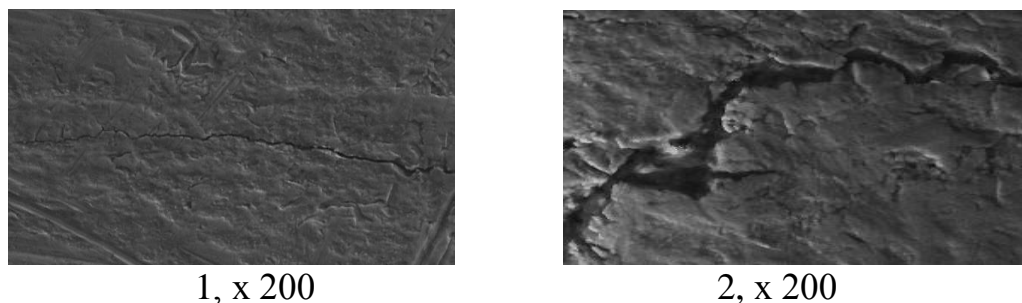
На основі отриманих результатів одержано геометричний образ функції відгуку Y_3 шляхом побудови відповідної геометричної поверхні (рис. 8). Проведено аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначено значення факторів, яке під час експериментальних досліджень здійснює найбільший чи найменший вплив.



а) $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі; б) $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі.

Рисунок 8 – Графік дослідження поверхні відгуку

Проведення порівняльного аналізу розповсюдження тріщин та поверхонь злому зразків із сталі 40ХН як без зміцнення, так із зміцненням за допомогою фрактографічних досліджень дозволило визначити природу та характер руйнування зразків (рис. 9).



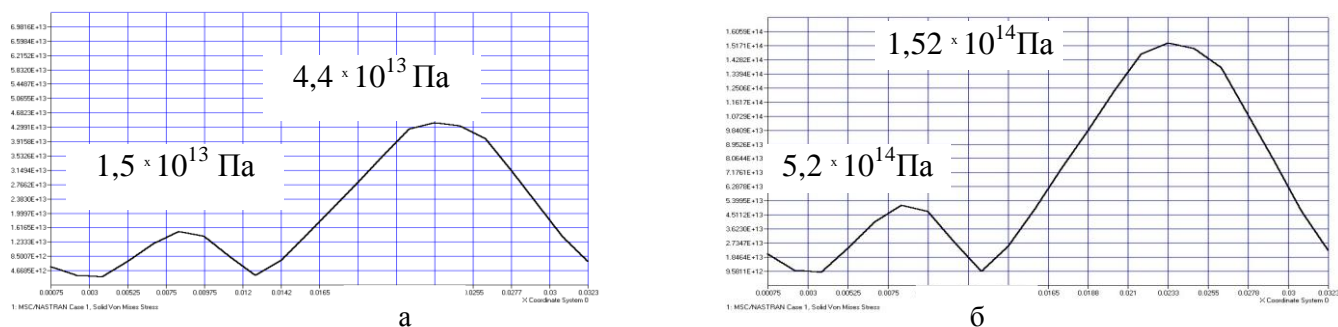
1 – зі зміцненим поверхневим шаром; 2 – без зміцненого поверхневого шару
Рисунок 9 – Характер розвитку тріщини по поверхні зразка

Аналіз виду тріщини показує, що в зразках без зміцненого поверхневого шару тріщина має розгалужено-зигзагоподібний напрямок руху. І навпаки, зразки із зміцненим поверхневим шаром характеризуються тріщинами тільки зигзагоподібного напрямку розповсюдження, що пояснюється блокуванням виходу тріщини на поверхню іонно-азотованим шаром.

Аналіз напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони за допомогою методу кінцево-елементного аналізу проведено на прикладі зразка зі зміцненням ІВГТЦПА і без зміцнення. В якості

початкових даних застосовувалися фізико-механічні властивості сталі 40ХН.

При аналізі полів еквівалентних напружень у моделі зразка без зміцненого поверхневого шару та зі зміцненим поверхневим шаром спостерігаємо у зміцнених зразків збільшення площі еквівалентних напружень на поверхні зразка, що свідчить про сприйняття зміцненим поверхневим шаром значної частини еквівалентних напружень при збереженні несучої здатності основи (рис. 10).



- а) у моделі зразка без зміцнення при середньому напруженні циклу, Па;
б) у моделі зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу, Па.

Рисунок 10 – Поля еквівалентних напружень

При порівняльному випробуванні в умовах циклічного згину та корозійного середовища різьбових з'єднань 3-26 частина зразків підлягала термообробці, а інша частина після термообробки підлягала зміцненню ІВГТЦПА.

Метод ІВГТЦПА дозволив збільшити кількість робочих циклів замкового різьбового з'єднання до його руйнування в 1,8–2 рази, у порівнянні з термообробленими зразками.

У п'ятому розділі здійснено узагальнення проведених дисертаційних досліджень. Проведено оптимізацію технологічного процесу та розроблено практичні рекомендації щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦПА. Запропоновано підхід до проведення техніко-економічного аналізу промислового використання удосконаленого технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару.

На основі результатів експериментальних досліджень та отриманих математичних моделей з допомогою ППП ПРИАМ проведено багатокритеріальну оптимізацію та визначено оптимальні параметри технологічного процесу формування



а - не зміцнений замок; б - зміцнений замок.

Рисунок 11 – Зовнішній вигляд замка бурильної колони 3-63,5

поверхневого шару ІВГТЦПА, а саме оптимальними параметрами технологічного процесу є: час дифузійного насичення (X_1) – 130 хв., тиск реакційного газу (X_2) – 190 Па, склад реакційного газу (X_3) –

60% Ar+40% N₂, температура газу (X_4) – 873 °K, величина температурного циклу (X_5) – 50 °K.

Перевірка достовірності

отриманих результатів проводилася шляхом формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА (рис. 11) за вказаними технологічними режимами, що отримані в результаті багатокритеріальної оптимізації й перевірки значень границі витривалості, зносо- та корозійної стійкості (критеріїв оптимізації). Відхилення від попередньо проведених експериментальних досліджень становлять 3–7%.

На підставі узагальнення результатів дисертаційних досліджень розроблено алгоритм підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦПА.

Для оцінки впливу застосування удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА на працездатність ЗРЗ БК в роботі проведено визначення математичного очікування середнього напрацювання до переходу в граничний стан зміцнених експериментальних зразків зі сталі 40ХН, який і характеризує працездатність. Кількісну оцінку працездатності здійснювали на основі триботехнічних досліджень. В результаті проведеного дослідження було з'ясовано, що середній технічний ресурс зміцнених ІВГТЦПА зразків виявився в 2,47 раза більше, ніж в термооброблених без ІВГТЦПА.

Проведено дослідження економічної ефективності технологічного процесу зміцнення замкових різьбових з'єднань ІВГТЦПА та встановлено, що застосування цього технологічного процесу дає можливість досягти економічний ефект від 6 до 15,5 млн. грн. на рік залежно від типу та вартості бурильного замка.

Достовірність отриманих в роботі наукових результатів підтверджується результатами проведених досліджень, коректністю застосування припущень і формулювання умов досліджень при моделюванні технологічного процесу ІВГТЦПА та малими значеннями розбіжностей між результатами експериментальних досліджень та математичного моделювання.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в науково-дослідних установах, на підприємствах при розробці технологічних процесів зміцнення конструктивних елементів бурильної колони.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено узагальнення експериментальних та теоретичних досліджень у галузі формування дифузійних шарів, які дозволили розвинути методику системного аналізу й синтезу комплексу властивостей зміцненого поверхневого шару і на базі отриманих результатів підвищити працездатність ЗРЗ БК ІВГТЦПА. Це дозволило вирішити актуальне наукове завдання, що має важливе значення для галузей національної економіки країни, а саме, розроблення комплексу науково-обґрунтованих технологічних рішень направлених на підвищення ефективності процесу буріння свердловин завдяки зміцненню ЗРЗ БК удосконаленим методом ІВГТЦПА, це дозволить запобігти ускладненням і аваріям при бурінні свердловин. Відсутність аналогічних рішень у нашій країні та за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, одержані в дисертації:

1. З метою створення зміцнених поверхневих шарів розроблено метод ІВГТЦПА, який базується на поєднанні імпульсного струму з періодичним чередуванням газотермоциклів, що дозволяє збільшити швидкість дифузійного

насичення, зменшити витрати електроенергії та реакційних газів з одночасним підвищенням працездатності ЗРЗ БК.

2. Дослідження сталі 40ХН зі зміцненим дифузійноазотованим поверхневим шаром ІВГТЦПА дозволили отримати нові експериментальні результати щодо визначення закономірності впливу параметрів дифузійного насичення на характеристики міцності та зносо- і корозійної стійкості. Визначено механічні властивості іонно-азотованого поверхневого шару, показана можливість керування ними за рахунок зміни параметрів технологічного процесу.

3. На основі отриманих експериментальних даних розроблено математичні моделі технологічного процесу ІВГТЦПА та встановлено залежність характеристик міцності та зносо- і корозійної стійкості сталі 40ХН зі зміцненим поверхневим шаром від одночасного впливу технологічних та експлуатаційних факторів. На основі побудованих за результатами експериментальних досліджень математичних моделей проведено багатокритеріальну оптимізацію ІВГТЦПА, що дозволяє розглядати технологію поверхневого зміцнення як спосіб управління властивостями зміцненого поверхневого шару.

4. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено технологічний процес ІВГТЦПА на замки БК, який полягає в імпульсному режимі обробки поверхневого шару та забезпечує підвищення границі витривалості на 20–40%, зносостійкості у 1,8–2,2 рази та корозійної стійкості на 1,7–3,1 рази в залежності від параметрів технологічного процесу, середньотехнічний ресурс зміцнених ІВГТЦПА зразків збільшився в 2,47 рази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ткач М. Я. Повышение долговечности резьбовых соединений бурильной колонны вакуумным газотермоциклическим ионным азотированием в импульсном режиме / В. И. Мирненко, А. В. Рутковский, М. Я. Ткач // НТПЖ. Уральский вестник. – Казахстан. – 2014. – 46 (125). – С. 42–51. **(Закордонне видання)**

2. Чернов Б. О. Удосконалений метод вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування елементів бурильної колони / Б. О. Чернов, А. В. Рутковський, М. Я. Ткач // всеукр. НТЖ. Розвідка та розробка газових та нафтових родовищ. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ. – 2014. – № 1 (50). – С. 44–50.

3. Мірненко В. І. Підвищення довговічності елементів бурильної колони методом дифузійного насичення при вакуумному газотермоциклічному іонному азотуванні в імпульсному режимі / В. І. Мірненко, Б. О. Чернов, О. В. Радько, М. Я. Ткач // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2013. – С. 136–142.

4. Мірненко В. І. Аналіз напружено-деформованого стану сталі 40ХН в умовах багатоциклової втоми з використанням методу кінцево-елементного аналізу / В. І. Мірненко, Б. О. Чернов, М. Я. Ткач // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2014. – С. 174–180.

5. Ткач М. Я. Оптимізація технологічного процесу вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування замкових різьбових з'єднань бурильної колони / М. Я. Ткач // НЖ. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К: НУОУ ім. І. Черняхівського, 2014. – № 3 (21). – С. 59-63.
6. Радько О. В. Підвищення зносостійкості елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / О. В. Радько, А. К. Скуратовський, М. Я. Ткач // НТЖ. Проблеми тертя та зношування. – К: НАУ 2014. – № 3 (64). – С. 53-59.
7. Чернов Б. О. Підвищення корозійної стійкості елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / Б. О. Чернов, В. І. Мірненко, М. Я. Ткач // всеукр. НТЖ. Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ 2014. – № 2 (22). – С. 44-50.
8. Чернов Б. О. Оцінка працездатності зміцненого шару поверхні елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / Б. О. Чернов, В. І. Мірненко, М. Я. Ткач // всеукр. НТЖ. Розвідка та розробка газових та нафтових родовищ. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ 2014. – № 4 (53). – С. 38–47.
9. Ткач М. Я. Методика визначення нижньої межі вартості зміцнених деталей вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / М. Я. Ткач // Збірник наукових праць. Менеджмент. – К: МАУ – 2014. – №17. – С. 265–274.
10. Ткач М. Я. Імпульсний режим іонно-плазмового азотування замкових різьбових з'єднань бурильної колони / М. Я. Ткач // Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012: тези доп. та виступів міжнародна наук.-практ. конф. молодих вчених, (Івано-Франківськ, 05—07 лист. 2012 р.) / ІФНТУНГ - ІФ., 2012. — С. 259–262.
11. Чернов Б. О. Вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування елементів бурильної колони / Б. О. Чернов, М. Я. Ткач, А. В. Рутковський // Нафтогазова енергетика – 2013: тези доп. та виступів міжнародна наук.-техн. конф., (Івано-Франківськ, 7—11 жовт. 2013 р.) / ІФНТУНГ - ІФ., 2012. — С. 532–535.
12. Мірненко В. І. Спосіб поверхневого зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильної колони вакуумним іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / В. І. Мірненко, А. В. Рутковський, М. Я. Ткач // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 14-го международ. науч.-техн. сем., (Свалява, 24—28 лют. 2014 р.) / АТМ України - С., 2014. — С. 169–170.
13. Мірненко В. І. Підвищення довговічності замкових різьбових з'єднань бурильної колони газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / Мірненко В. І., Ткач М. Я., Ляшенко Б. А., Рутковський А. В., Радько О.В. // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 14-й международ. науч.-техн. конф., (Крым, Ялта, 02—06 июн. 2014 р.) / АТМ України - С., 2014. — С. 85–87.
14. Чернов Б. О. Шляхи підвищення працездатності елементів бурильної колони при бурінні свердловин / Б. О. Чернов, М. Я. Ткач // Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи: тези доп. та виступів міжнародна наук.-техн. конф., (Івано-Франківськ, 10—12 груд. 2014 р.) / ІФНТУНГ - ІФ., 2014. — С. 205–207.

15. Копей Б. В. Підвищення ресурсу замкових різьб бурильної колони азотуванням / Б. В. Копей, В. І. Мірненко, М. Я. Ткач // *Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу ІМ – 2016: тези доп. та виступів міжнародна наук.-техн. конф., (Івано-Франківськ, 16—20 травня 2016 р.)* / ІФНТУНГ — ІФ., 2016. — С. 312–314.

16. Пат. 91096 Україна, МПК (2006.01) C23C 8/36. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей з різьбовою поверхнею іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ткач М. Я., Мірненко В. І, Ляшенко Б. А., Радько О. В., Рутковський А. В.; заявник та патентовласник Ткач Микола Ярославович; заявл. 12.12.13 ; опубл. 25.06.14, бюл. № 12.

АНОТАЦІЯ

Ткач М. Я. Підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розроблення комплексу науково-обґрунтованих технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу буріння свердловин завдяки зміцненню ЗРЗ БК удосконаленим методом ІВГТЦПА.

Для досягнення мети було удосконалено метод імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування. За допомогою результатів проведеного комплексу експериментальних досліджень отримано математичні моделі, що описують залежності критеріїв оптимізації зносостійкості, границі витривалості та корозійної стійкості ЗРЗ БК від технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів, проведено оптимізацію технологічного процесу ІВГТЦПА. Установлено параметри технологічного процесу й одержувані при цьому компонування та структуру зміцненого поверхневого шару, при яких характеристики міцності та зносо- і корозійної стійкості підвищуються.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень удосконалено технологічний процес ІВГТЦПА для підвищення працездатності ЗРЗ БК, який полягає в імпульсному режимі обробки поверхневого шару та забезпечує підвищення межі витривалості на 20–40%, зносостійкості в 1,8–2,2 рази та корозійної стійкості у 1,7–3,1 рази, залежно від параметрів технологічного процесу.

Ключові слова: працездатність, замкові різьбові з'єднання бурильних колон, імпульсне вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування, зносостійкість, корозійна стійкість, границя витривалості.

ABSTRACT

Tkach M. Y. Increasing of Efficiency of Locking Threaded Connections of a Drill String by Pulse Vacuum And Gasterosteus Ion-Plasma Nitriding. - The manuscript.

The dissertation on a degree of candidate of technical Sciences, specialty 05.05.12 –

machines of oil and gas industry. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2016.

The thesis is devoted to the urgent scientific task on development of a set of scientific reasonable technological solutions aimed at the effectiveness increasing of the process of drilling holes through the efficiency increasing of locking threaded connections of a drill string by a pulse vacuum and gasterosteus ion-plasma nitriding method.

To achieve the goal, a method of the pulse vacuum and gasterosteus ion-plasma nitriding was improved. With the help of the results of conducted experiments, the mathematical models were obtained, that show the criteria dependence of wear resistance optimization, endurance limits and corrosion resistance of locking threaded connections of a drill string from technological, functional and maintenance factors as well as the optimization of locking threaded connections of a drill string by pulse vacuum and gasterosteus ion-plasma nitriding method has been carried out. The following things were determined: parameters of the technological process and certain composition and structure of the strengthened surface layer. The defined parameters increase substantiality, maintenance and corrosion resistance.

Based on theoretical and experimental studies the technological process of locking threaded connections of a drill string by pulse vacuum and gasterosteus ion-plasma nitriding was improved with a purpose to increase the efficiency of locking threaded connections of a drill string. The core of this process is a pulse mode of processing of the surface layer and it ensures the increasing substantiality limit by 20...40%, the wear resistance by 1.8–2.2 times and the corrosion resistance by 1.7–3.1 times, depending on the technological process parameters.

Keywords: performance, locking threaded connections of a drill string columns, pulse vacuum and gasterosteus ion-plasma nitriding, wears resistance, corrosion resistance, substantiality limit, and optimization.

АННОТАЦИЯ

Ткач М. Я. Повышение работоспособности замковых резьбовых соединений бурильной колонны импульсным вакуумным газотермоциклическим ионно-плазменным азотированием. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.12 – машины нефтяной и газовой промышленности. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2016.

Диссертация посвящена решению актуального научного задания разработки комплекса научно обоснованных технологических решений направленных на повышение эффективности процесса бурения скважин благодаря упрочнению ЗРЗ БК усовершенствованным методом ИВГТЦИПА.

Установлено, что основными видами разрушения конструкционных элементов БК является разрушение от усталости, коррозионного повреждения и износа. Анализ статистических данных свидетельствует, что из всех бракованных деталей БК 45% составляют ЗРЗ.

На основе анализа существующих методов поверхностного упрочнения замков БК и требований к геометрическим параметрам и механическим свойствам

поверхностных слоев укрепляемых деталей установлено, что наиболее перспективным сейчас является метод ВИПА. Однако широкому внедрению технологического процесса вакуумного ионно-плазменного азотирования мешают отсутствие оптимальных параметров поверхностного упрочнения методом ВИПА и современного качественного оборудования для реализации метода. Кроме того, существующие подходы к организации технологического процесса ВИПА используют только отдельные потенциальные возможности повышения его эффективности и не учитывают реализацию процесса в импульсном газотермоциклическом режиме, поэтому в работе предлагается использовать усовершенствованные методы импульсного вакуумного газотермоциклического ионно-плазменного азотирования.

В работе обоснован выбор направления исследования и разработан общий подход к выполнению поставленных заданий для всесторонней комплексной оценки свойств поверхностных слоев на базе системного подхода к выполнению работы и комплексной оценки поверхностных слоев. Задача оптимизации технологического процесса поверхностного упрочнения ЗРЗ БК с помощью ИВГТЦИПА рассматривалась как многофакторная и многокритериальная, план эксперимента был построен с помощью пакета прикладных программ ПРИАМ.

В результате экспериментальных исследований установлено закономерность влияния технологических параметров ИВГТЦИПА на механические свойства упрочненного поверхностного слоя. Показано, что благодаря использованию ИВГТЦИПА повышается износостойкость в 1,8–2,2 раза, а коррозионная стойкость в 1,7–3,1 раза, предел выносливости на 20–40%, в зависимости от технологического режима его формирования.

Полученные математические модели технологического процесса формирования упрочненного поверхностного слоя ИВГТЦИПА по критериям предела выносливости, износо- и коррозионной стойкости, способствуют разработке принципа управления свойствами поверхностного слоя.

Разработан алгоритм процесса повышения работоспособности ЗРЗ БК ИВГТЦИПА. Данный алгоритм может применяться при создании (разработке и производстве) и эксплуатации ЗРЗ БК.

Установлено повышение среднего технического ресурса упрочненных ИВГТЦИПА образцов в 2,47 раза, по сравнению с образцами без упрочнения.

Проведено исследование экономической эффективности технологического процесса упрочнения замковых резьбовых соединений ИВГТЦИПА и установлено, что применение данного технологического процесса позволяет достигать экономического эффекта от 6 до 15,5 миллионов гривен в год, в зависимости от типа и стоимости бурильного замка.

Ключевые слова: работоспособность, замковые резьбовые соединения бурильных колонн, импульсное вакуумное газотермоциклическое ионно-плазменное азотирование, износостойкость, коррозионная стойкость, предел прочности.

