

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

<sup>1</sup>В.І. Мірненко, <sup>1</sup>М.Я. Ткач, <sup>2</sup>Л.Д. Пилипів

<sup>1</sup> Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського;  
03149, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 28, тел. (044) 2710596

<sup>2</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. (0342) 248090

*Провівши аналіз аварійності при бурінні нафтових та газових свердловин, було з'ясовано, що велика кількість аварій пов'язана з руйнуванням елементів бурильної колони, а саме замкових різьбових з'єднань в результаті впливу статичних і динамічних навантажень. Для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильної колони (ЗРЗ БК) було запропоновано удосконалену модель імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування (ІВГТЦПА). Проведено оптимізацію даного технологічного процесу та доведено, що він дозволяє кратно підвищити працездатність ЗРЗ БК.*

Ключові слова: бурильна колона, замкове різьбове з'єднання, азотування

*Проведя аналіз аварійності при бурінні нафтяних і газових скважин, було встановлено, що більше количество аварій связано с разрушением элементов бурильной колонны, а именно замковых резьбовых соединений в результате воздействия статических и динамических нагрузок. Для укрепления замковых резьбовых соединений бурильной колонны (ЗРС БК) была предложена усовершенствованная модель импульсного вакуумного газотермоциклического ионно-плазменного азотирования (ИВГТЦПА). Проведена оптимизация данного технологического процесса и доказано, что он позволяет кратно повысить работоспособность ЗРЗ БК.*

Ключевые слова: бурильная колонна, замковое резьбовое соединение, азотирование.

*Having analyzed failures in drilling oil and gas wells, it has been established that a large number of failures is associated with the destruction of the drill string elements, namely threaded tool joints by the impact of the static and dynamic loads. To strengthen the threaded tool joints of the drill string an improved model of the impulsive vacuum gas-thermo-cyclic plasma nitride hardening has been proposed. The process has been optimized and it has been proved that it allows the performance increase of threaded tool joints.*

Key words: drill string, threaded tool joints, nitride hardening

**Вступ.** Результати дослідження великої кількості аварій з елементами бурильної колони свідчать, що їхнє руйнування зазвичай має втомилий характер за наявності агресивного середовища. Явища втоми виникають у результаті дії змінних навантажень, до яких відносяться змінний вигин, крутильний удар і коливання бурильної колони. При цьому процес руйнування від втоми супроводжується корозійним пошкодженням і інтенсивним зношуванням. Найбільша кількість аварій під час буріння свердловин пов'язана з руйнуванням ЗРЗ БК. Характерними видами руйнувань в результаті обстеження замкових з'єднань бурильних труб є злами, розмиви, заїдання, зриви, зношування, які супроводжуються також і корозійною втомою металу. Під час згвинчування та розгвинчування замкових різьбових з'єднань зі значним крутним моментом зношуються витки різьби, виникають пружні деформації і контактний тиск у зоні дотику витків різьби [1, 2], що призводить до накопичення ушкоджень і в подальшому – до руйнування.

Підвищення працездатності ЗРЗ БК є сьогодні сукупністю багатьох часткових проблем створення умов для забезпечення максимально-го 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, виготовлення та підтримання високого рівня працездатності ЗРЗ БК у межах експлуатаційних навантажень, але забезпечення працездатності ЗРЗ БК неможливе без встановлення закономірностей впливу технологічних процесів виготовлення та умов експлуатації на властивості конструкційного матеріалу.

Таким чином, збереження і підтримання в процесі експлуатації якості різьби замкового з'єднання бурильних труб є необхідною умовою забезпечення їхньої працездатності, що, в свою чергу, позитивно відобразиться на роботі бурильної колони загалом та надасть можливість уникнути значної кількості ускладнень та аварій під час буріння свердловин.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Вивченню навантажень, що діють у різьбовому з'єднанні бурильної колони, дослідженням їх впливу на

працездатність різьбових з'єднань та розробці нових методів підвищення їх працездатності, присвячено цілий ряд робіт таких вчених, як: Крижанівський Є. І.; Чернов Б. О.; Айзупе Е.А.; Давидов Г. А.; Расулов Н. М., Ярошевський Ф.М.; Сароян А. Е.; Щербюк Н. Д., Лачинян Л. А. та багатьох інших.

Існуючі наукові праці присвячені вирішенню головної проблеми – підвищенню стійкості ЗРЗ БК до навантажень (динамічних, циклічних та корозійній втомі, зменшенню тертя між витками різьби та сповільненню їх зношування) вплив яких призводить до їх руйнування. Тому вчені спрямовували свої дослідження щодо розробки нових або удосконаленню існуючих конструкцій і типів з'єднань бурильних і обсадних труб, конструктивних і технологічних параметрів конічного різьбового з'єднання, мастильних речовин, які захищають витки різьбового з'єднання, а також технологічних процесів, що дозволяють значно покращити робочі властивості ЗРЗ БК.

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** На сьогодні існує велика кількість технологічних процесів, які дозволяють здійснювати поверхневе зміцнення ЗРЗ БК, але кожен з них має ряд недоліків (висока собівартість процесу, шкідливість для людини та навколишнього середовища, велика тривалість процесу та витрата енергоносіїв і робочого матеріалу, покращення тільки одного із критеріїв, які характеризують працездатність і повна відсутність впливу на інші, низька якість зміцненого поверхневого шару та ін.) і не повною мірою відповідають існуючим вимогам.

Серед великої кількості технологічних процесів, перспективним для покращення механічних властивостей різьбових з'єднань бурильної колони є імпульсне вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування (ІВГТЦПА) [3].

**Головною ціллю статті** є висвітлення проведених досліджень, які дозволять підвищити працездатність ЗРЗ БК методом імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмowego азотування та встановлення закономірностей впливу його параметрів на їх втомну міцність, зносостійкість та корозійну стійкість.

**Основна частина.** Суть ІВГТЦПА полягає в тому, що у розрідженому газовому середовищі, яке містить азот, між катодом (деталлю) та анодом (стілки вакуумної камери) подається тліючий розряд (етап нагрівання), який при досягненні деталлю необхідної температури (400 °С) переходить в пульсуючий струм 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. В середовищі робочого газу охолоджують до кімнатної температури, а потім виймають деталь з різьбовою поверхнею із контейнера [4]. Завдяки використанню пульсуючого струму розряду і газотермічних циклів насичення поверхневих шарів значно скорочується час обробки (до 2-3 год.), витрата електроенергії і робочих газів. Також дана технологія є екологічно чистою та безпечною для людини.

Метод ІВГТЦПА є удосконаленням відомого методу вакуумного іонно-плазмowego азотування за рахунок здійснення його в умовах газотермоциклічного режиму та імпульсного струму.

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

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

де  $L_N$  – товщина нітридної зони;

$C_D \langle V_x \rangle_F \cdot t = x_{ГТЦ}$  – зміна глибини проникнення дифузанта, що залежить від дефектів кристалічної ґратки та параметрів ІВГТЦПА.

При дослідженні мікротвердості зміцнених ІВГТЦПА поверхневих шарів сталі 40ХН 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  $Cr_2C_{0,6}N_{0,3}$  – трикомпонентне з'єднання типу твердого розчину з широкою областю гомогенності. Пошаровий рентгенівський аналіз показав, що в приповерхневій зоні існує азотований шар, який складається з  $\epsilon - (Fe_{2-3}N)$  і  $\gamma - (Fe_4N)$  – фаз. У міру зрівнювання шарів залишаються нижні нітриди і тверді розчини з різною концентрацією азоту.

У результаті проведених досліджень залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі встановлено, що значення величини залишкових напружень на поверхні деталі зменшуються та залежить від умов попередньої термообробки і температури формування зміцненого поверхневого шару. Тобто, напруження стискання поступово зменшуються з глибиною і дорівнюють нулю там, де закінчується дифузійний шар.

Для встановлення закономірностей впливу параметрів ІВГТЦПА на механічні властивості ЗРЗ БК використовувався системний підхід, задача оптимізації технологічного процесу роз-

Таблиця 1 – План експерименту в натуральних координатах

№ досліду	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$
1	170	140	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	773	75	14
2	130	190	60% Ar+40% N <sub>2</sub>	873	50	20
3	200	80	90% Ar+10% N <sub>2</sub>	673	100	8
4	110	170	90% Ar+10% N <sub>2</sub>	873	90	5
5	190	50	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	773	40	16
6	150	100	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	673	110	22
7	220	220	60% Ar+40% N <sub>2</sub>	773	60	11
8	100	230	90% Ar+10% N <sub>2</sub>	673	44	3
9	180	120	60% Ar+40% N <sub>2</sub>	873	95	15
10	140	70	90% Ar+10% N <sub>2</sub>	773	65	20
11	210	180	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	673	120	9
12	120	90	60% Ar+40% N <sub>2</sub>	873	80	7
13	190	200	90% Ar+10% N <sub>2</sub>	673	30	18
14	160	130	60% Ar+40% N <sub>2</sub>	773	106	24
15	230	40	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	873	56	12
16	90	150	75% Ar+25% N <sub>2</sub>	673	70	8

глядалася як багатфакторна (з урахуванням конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів) та багатокритеріальна (з оптимізацією за трьома критеріями оптимізації). В якості критеріїв оптимізації технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару було вибрано:  $Y_1$  – зносостійкість зміцненого матеріалу, що характеризується інтенсивністю зношування;  $Y_2$  – корозійна стійкість зміцненого матеріалу, що характеризується питомим збільшенням маси зразків у залежності від часу випробувань;  $Y_3$  – границі витривалості при симетричному циклі. Використовуючи методи експертної оцінки і зробивши серію відсіюючих експериментів, було отримано ранжувальний ряд факторів, які впливають на якість технологічного процесу ІВГТЦПА та на основі аналізу ранжування визначено групу факторів, що найбільше впливають на величину критеріїв оптимізації ( $X_1$  – час дифузійного насичення,  $X_2$  – тиск реакційного газу,  $X_3$  – склад реакційного газу,  $X_4$  – температура газу,  $X_5$  – величина температурного циклу та  $X_6$  – навантаження в умовах тертя), встановлено рівні їх варіювання та згенеровано план експерименту на основі ЛП<sub>7</sub>-чисел (табл. 1), за яким проводилось формування та дослідження зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА.

Зміцнення дослідних зразків проводилось на установці ВПА-1, яка знаходиться в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України (рис. 1).

Згідно із згенерованим планом експерименту проводилися експериментальні дослідження щодо оцінки закономірності впливу технологічного процесу ІВГТЦПА на інтенсивність зношування, корозійну стійкість, границю витривалості зразків із сталі 40ХН та відповідно до результатів отримано математичні моделі технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару за критеріями інтенсивності зношування, питомого збільшення маси



Рисунок 1 – Загальний вигляд установки ВПА-1

зразків залежно від часу випробувань, границі витривалості при симетричному циклі, розрахунок моделей здійснювався за допомогою пакету прикладних програм планування регресії і аналізу моделей (ППП ПРІАМ). Отримані залежності перевірялися на адекватність, відтворюваність та інформативність результатів за критеріями математичної статистики.

Триботехнічні характеристики зміцнених ІВГТЦПА поверхневих шарів визначали на машині тертя СМТ-1. При дослідженні використовувалася пара тертя “диск-колодка”. Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів частина зразків підлягала термообробці, а інша після термообробки підлягала зміцненню ІВГТЦПА. Проводилися заміри коефіцієнта тертя та розраховували вагову інтенсивність зношування  $I$  у кг/см<sup>2</sup> на 1000 м шляху тертя [5].

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

Таблиця 2 – Результати триботехнічних випробувань

№ режиму обробки	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-5}$ кг·см <sup>-2</sup> на 1000 м шляху	
	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$
1	1,47	1,41
2	1,56	1,60
3	1,43	1,40
4	1,27	1,29
5	1,43	1,44
6	1,99	2,03
7	2,26	2,23
8	1,35	1,32
9	1,40	1,41
10	1,67	1,71
11	1,37	1,35
12	1,33	1,30
13	1,53	1,50
14	2,50	2,53
15	1,53	1,49
16	1,52	1,55

Після обробки результатів експерименту отримано математичну модель, що описує залежність інтенсивності зношування  $I$  від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

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

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

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує інтенсивність зношування сталі зі зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА (рис. 2, 3).

Випробування на корозійну стійкість зразків зі сталі 40ХН проводили протягом 10-годинного дослідження плоских зразків в алундових тиглях при температурі 973 °К [6]. Перед початком дослідів та через кожні 2 години витримування на поверхню зразків наносили сольову обмазку, яка складалася з  $Na_2SO_4$  та  $NaCl$  (у співвідношенні 3:1). Частина зразків була термооброблена, а частина після термообробки була зміцнена ІВГТЦПА (рис. 4). Встановлено, що завдяки впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА відбувається підвищення корозійної стійкості у 1,5...3 разів (табл. 3). Крім цього визначено, що корозійне пошкодження зразків без обробки ІВГТЦПА відбувається на значно більшу глибину, ніж у зміцнених (рис. 5).

Після обробки результатів експерименту отримана математична модель, що описує залежність питомого збільшення маси зразка від технологічних та експлуатаційних факторів, та проведено графічне дослідження їх впливу на корозійну стійкість сталі 40ХН зі зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА (рис. 6, 7).

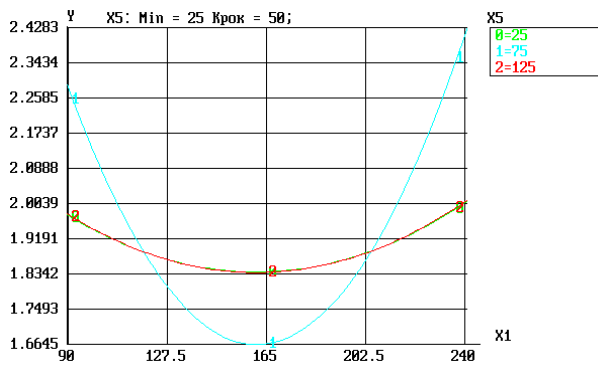


Рисунок 2 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y_1 = f(X_1, X_5)$  при  $X_3=60\%Ar+40\%N_2$ ,  $X_4=673$  °K,  $X_6=2,5$  МПа

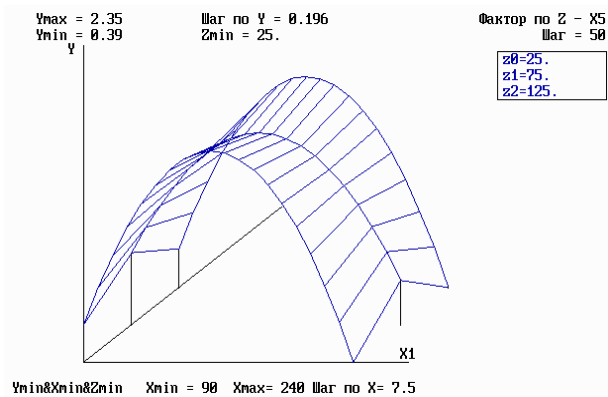


Рисунок 3 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_1 = f(X_1, X_5)$  в тривимірному просторі при  $X_4=673$  °K,  $X_6=2,5$  МПа

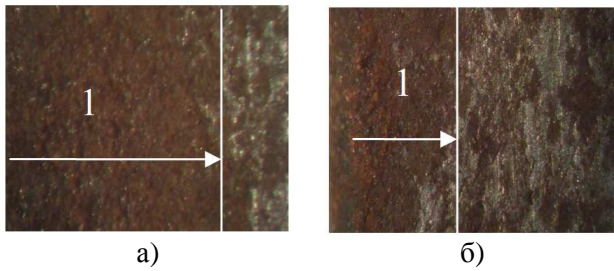


Рисунок 4 – Зразки для випробування на корозійну стійкість

Таблиця 3 – Результати дослідження корозійної стійкості азотованих зразків

№ режиму обробки	Питоме збільшення маси зразка $\Delta m/m$ після 10 годин випробувань	
	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$
без обробки	0,52	0,48
1	0,42	0,40
2	0,17	0,23
3	0,27	0,29
4	0,23	0,21
5	0,19	0,24
6	0,24	0,27
7	0,25	0,24
8	0,26	0,29
9	0,17	0,19
10	0,22	0,18
11	0,23	0,28
12	0,26	0,23
13	0,18	0,26
14	0,24	0,26
15	0,25	0,23
16	0,25	0,28



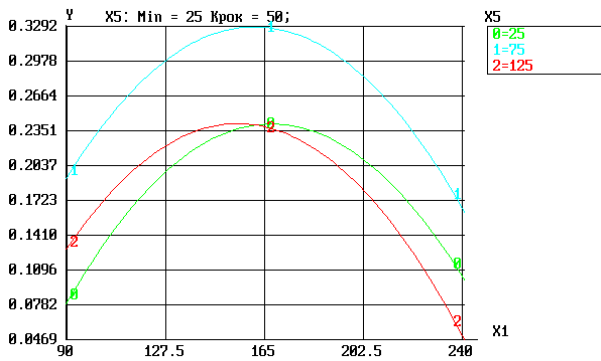


1) – зона корозійного пошкодження;  
а) без ІВГТЦПА та б) зміцненого ІВГТЦПА

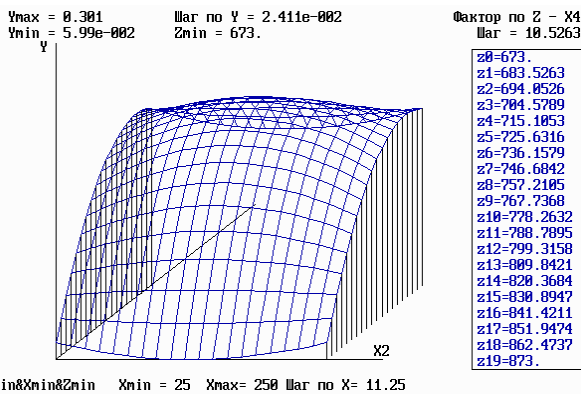
**Рисунок 5 – Зміна величини зони корозійного пошкодження**

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

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



**Рисунок 6 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y_2 = f(X_1, X_5)$  при  $X_2=25$  Па,  $X_3=60\%Ar+40\%N_2$ ,  $X_4=673$  °К**



**Рисунок 7 – Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_2 = f(X_2, X_4)$  в тривимірному просторі при  $X_1=90$  хв.,  $X_3=60\%Ar+40\%N_2$ ,  $X_5=25$  °К**

Випробування зразків зі сталі 40ХН на втому проводилися на високочастотній магнітострикційній установці [7]. Основні умови роботи експериментального обладнання полягають в тому, що робоча частота установки, при якій можливе її використання для випробування на втому, лежить у межах  $\sim 9,8...10,8$  кГц. Принцип дії вібратора установки заснований на використанні явища магнітострикції.

Згідно з методикою експериментальних досліджень використовувалася база випробувань на втому  $N=10^7$  циклів навантаження. Частина зразків була термооброблена, а інша частина після термообробки підлягала зміцненню ІВГТЦПА. Для визначення опору втомі зміцнених ІВГТЦПА сталевих зразків та побудови кривої втомі досліджували не менше 10...15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування. При цьому амплітуду коливання зразка й частоту навантаження протягом всього часу дослідження майже до його руйнування підтримували постійною.

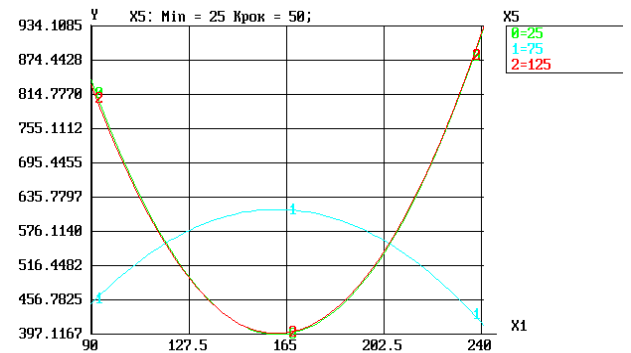
В результаті проведених досліджень було з'ясовано, що завдяки технологічному процесу ІВГТЦПА вдалося підвищити границю витривалості сталі 40ХН на 15...20%, в залежності від параметрів технологічного процесу, зі збільшенням кількості циклів до руйнування.

Після обробки результатів експерименту отримана математична модель, що описує залежність границі витривалості від технологічних та експлуатаційних факторів.

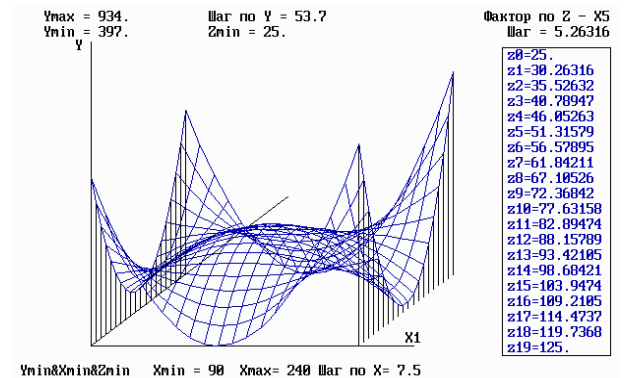
$$Y_3 = 554,961 + 321,398 x_1^2 x_2^2 x_3 x_5^2 + 14,4129 x_4 + 39,8087 x_1 x_4 x_5, \quad (4.19)$$

де  $Y_3$  – математична модель у кодованих значеннях для границі витривалості  $\sigma_{-1}$ .

Також було проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації (рис. 8, 9), що характеризує границю витривалості сталі 40ХН із зміцненням поверхневим шаром ІВГТЦПА.



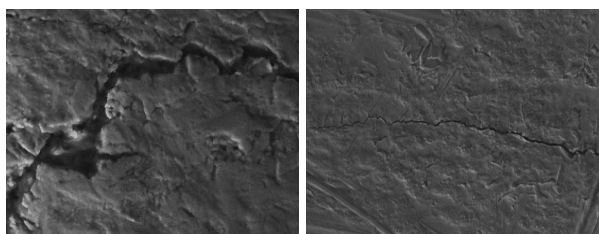
**Рисунок 8 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y_3 = f(X_1, X_5)$  при  $X_2=137,5$  Па,  $X_3=60\%Ar+40\%N_2$ ,  $X_4=773$  °К**



**Рисунок 9 – Графіки частинних рівнянь регресії  $Y_3 = f(X_1, X_5)$  при  $X_2=137,5$  Па,  $X_3=60\%Ar+40\%N_2$ ,  $X_4=773$  °К**

На зразках зі сталі 40ХН, які використовувалися при дослідженні на втому, було проведено фактографічний аналіз їхнього руйнування як зміцнених ІВГТЦПА, так і не зміцнених. Для фактографічних досліджень використовувалася макроскопічна і мікроскопічна фактографія зломів зразків.

В результаті порівняльного фактографічного аналізу встановлено характер руйнування, який полягає у тому, що у незміцненому зразку тріщина починається з поверхневого шару і розповсюджується в основу зразка. Місце виникнення тріщини на поверхні характеризується місцем найбільшої концентрації напружень та дефектів як технологічного, так і експлуатаційного походження. При дослідженні зміцнених ІВГТЦПА зразків встановлено, що тріщина зароджується в основі зразка, і її подальший розвиток стримується зміцненим іонно-азотованим поверхневим шаром. При збільшенні навантаження тріщина інтенсивно розвивається в місцях, що мають технологічні дефекти, і в подальшому руйнує зміцнений поверхневий шар (рис. 10).



1, x 200

2, x 200

1 – без зміцненого поверхневого шару;  
2 – зі зміцненим поверхневим шаром

**Рисунок 10 – Характер розвитку тріщини по поверхні зразка**

При аналізі напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони за допомогою кінцево-елементного аналізу використовували програмне забезпечення NASTRAN. За модель брався зразок, який використовувався для випробувань на втому.

В якості початкових даних застосовувалися фізичні властивості сталі 40ХН [8]. Модель напружено-деформованого стану характеризувалася поділом зразка на кінцеві елементи з полями переміщень в умовах дії втомного навантаження. Модель напружено-деформованого стану зразка (рис. 11, 12) без зміцнення складається із 460 вузлів та має 264 елементи, а зміцненого – 690 вузлів та 440 елементів, що необхідно для більш детального вивчення впливу режимів технологічного процесу.

Встановлено, що в моделі напружено-деформованого стану зміцненого зразка у порівнянні з моделлю зразка без зміцнення спостерігаємо збільшення еквівалентних напружень на поверхні зразка та зменшення їх ширини в поперечному перетині (рис. 13). Напруження, які може витримувати зміцнений зразок, збільшилися в 2,1 рази.

Втомні випробування замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині в умовах корозійної втоми проводилися на стенді ЗКШ-25. 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 [9] (рис. 14).

Для проведення випробування частина зразків підлягала термообробці, а інша частина після термообробки зміцнювалася ІВГТЦПА. Для випробувань замкових різьбових з'єднань було створено робоче середовище. Використовували 3% розчин NaCl, пластову воду та нафтові емульсії. Кожний зразок доводили до руйнування, при цьому частоту обертання зразка (15,2 Гц) та навантаження (40 кг) протягом всього часу дослідження підтримували постійною.

В результаті проведених експериментальних досліджень було з'ясовано, що удосконалений метод ІВГТЦПА дозволив збільшити кількість робочих циклів замкового різьбового з'єднання до його руйнування в 1,8 – 2 рази порівняно з термообробленими зразками.

На основі результатів експериментальних досліджень та отриманих математичних моделей з допомогою ППП ПРІАМ проведено багатокритеріальну оптимізацію та визначено оптимальні параметри технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА: час дифузійного насичення ( $X_1$ ) – 130 хв., тиск реакційного газу ( $X_2$ ) – 190 Па, склад реакційного газу ( $X_3$ ) – 60%Ar+40%N<sub>2</sub>, температура газу ( $X_4$ ) – 873 °K, величина температурного циклу ( $X_5$ ) – 50 °K [10].

Перевірка достовірності отриманих результатів проводилася шляхом формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА за вказаними технологічними режимами, що отримані в результаті багатокритеріальної оптимізації й перевірки значень границі витривалості, зносу- 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 об'єктивного підходу щодо вирішення наукового завдання було проведено кількісну оцінку працездатності зміцнених замкових різьбових з'єднань бурильної колони. Для оцінки впливу застосування удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА на працездатність ЗРЗ БК в роботі проводилося визначення математичного очікування середнього напруження до переходу в граничний стан зміцнених експериментальних зразків зі сталі 40ХН. Кількісну оцінку довговічності здійснювали на основі порівняльних триботехнічних досліджень незміцнених і зміцнених зразків зі сталі 40ХН.

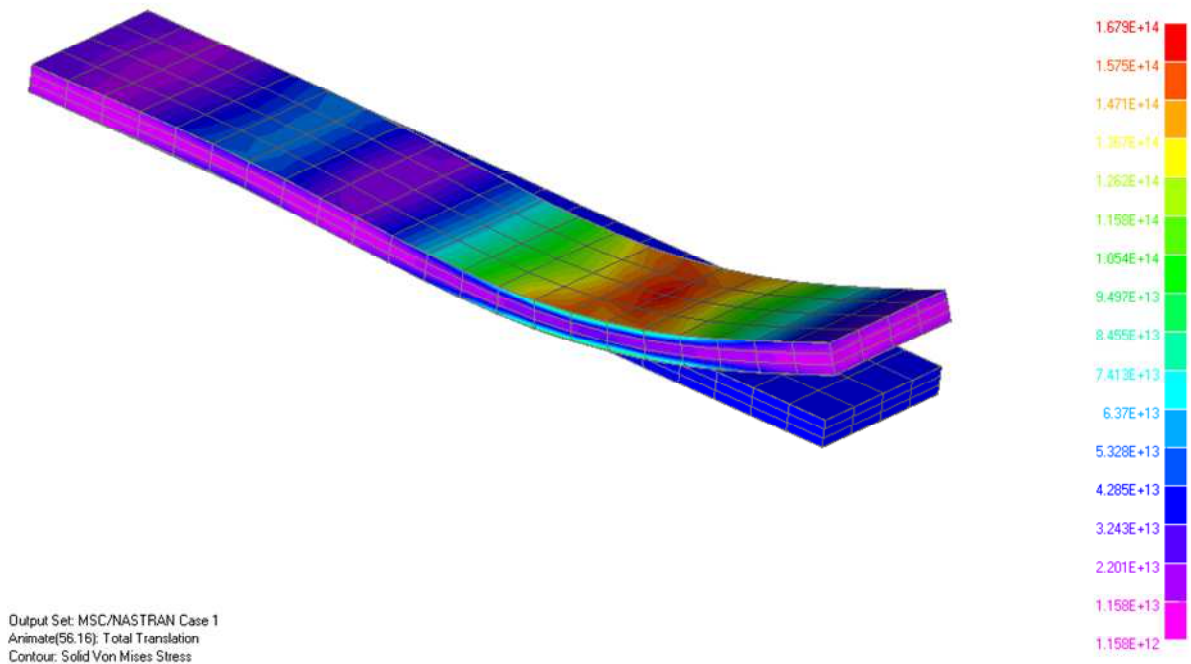


Рисунок 11 – Модель напружено-деформованого стану зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу, Па

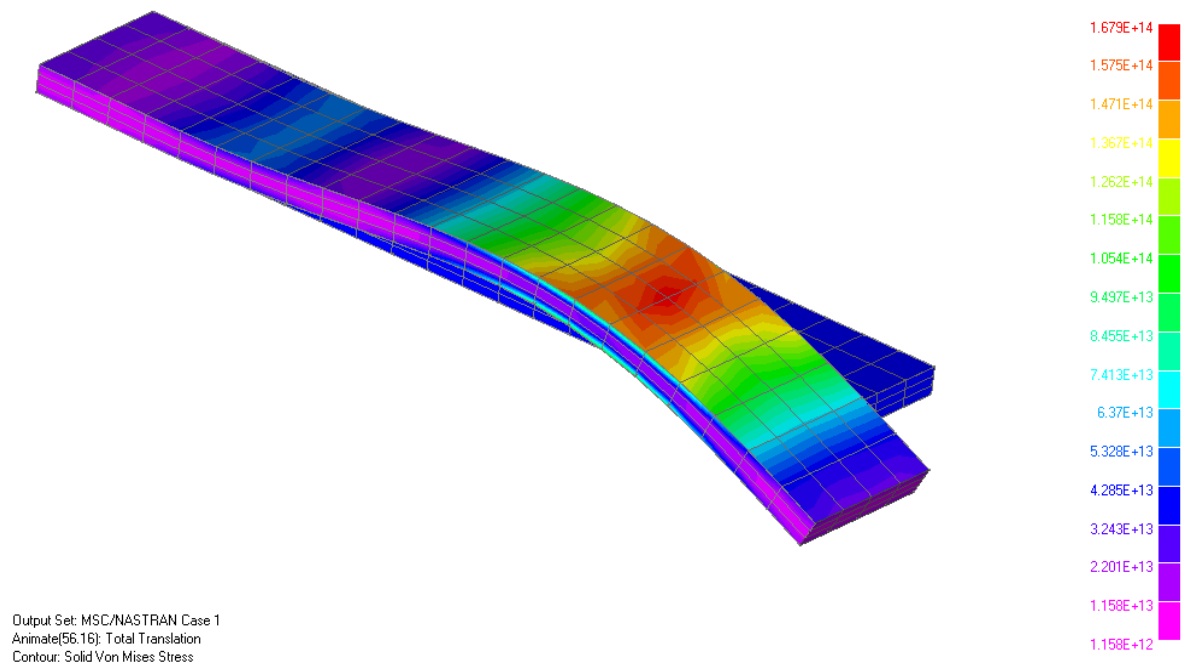


Рисунок 12 – Модель напружено-деформованого стану зміцненого зразка при мінімальному напруженні циклу, Па

Випробуванням підлягали 20 термооброблених зразків зі сталі 40ХН (не зміцнених ІВГТЦПА) і 20 зразків після термообробки і подальшого зміцнення ІВГТЦПА. Зміцнення здійснювалося на установці ВПА-1 за оптимальними параметрами технологічного процесу ІВГТЦПА. В результаті було з'ясовано, що середній технічний ресурс зміцнених ІВГТЦПА зразків виявився в 2,47 рази більшим, ніж в термооброблених без ІВГТЦПА.

Для того, щоб визначити економічну ефективність від упровадження технологічного процесу ІВГТЦПА, для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильних колон було проведено відповідні розрахунки і визначено, що при річній нормі зміцнення замків від 1440 до 9600 шт. (залежно від геометричного розміру замків) застосування методу ІВГТЦПА дає можливість досягти економічний ефект від 6 до 15,5 млн. грн. на рік (при використанні однієї установки).

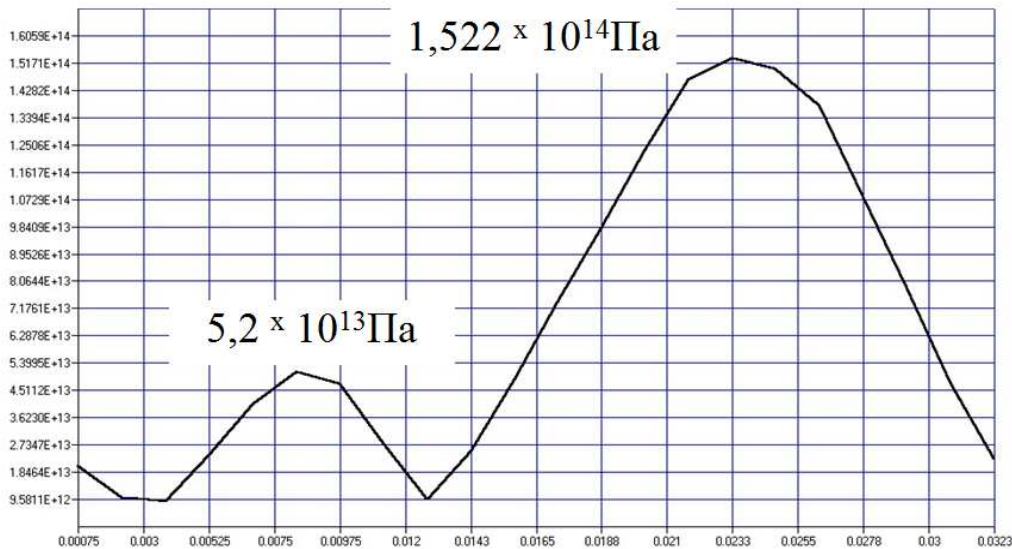


Рисунок 13 – Графік зміни напружень по довжині зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу

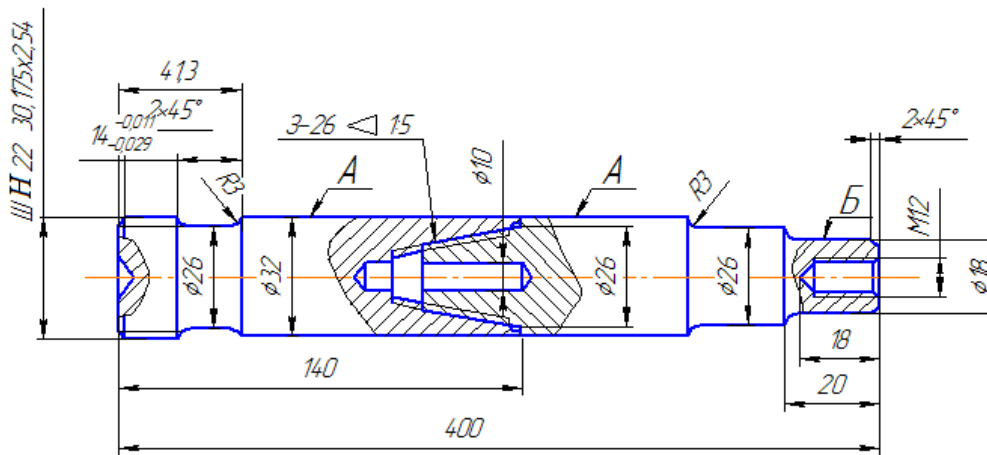


Рисунок 14 - Модель замкового різьбового з'єднання 3-26 [9]

### Висновок

Отже розроблений технологічний процес ІВГТЦПА ЗРЗ БК, який полягає в імпульсному та газотермоциклічному режимі обробки поверхневого шару забезпечує підвищення границі витривалості на 20...40%, зносостійкості – у 1,8...2,2 рази та корозійної стійкості – на 1,7...3,1 рази залежно від параметрів технологічного процесу, середньотехнічний ресурс зміцнених ІВГТЦПА зразків збільшився в 2,47 рази.

### Література

1 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 // Породоразрушаючий і металлообробляючий інструмент – техніка і технологія его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2013. – С. 136-142.

2 Frode Bjørheim Drilling thread types for dummies / Frode Bjørheim // <http://blog.odfjellwellservices.com/drilling-thread-types-for-dummies>.

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

4 Пат. 91096 Україна, МПК (2006.01) С23С 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.

5 Радько О. В. Підвищення зносостійкості елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / О. В. Радько, А. К. Скуратовський, М. Я. Ткач // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – №3(64). – С. 53-59.



6 Чернов Б. О. Підвищення корозійної стійкості елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням / Б. О. Чернов, В. І. Мірненко, М. Я. Ткач // Нафтогазова енергетика. – 2014. – №2(22). – С. 44-50.

7 Ляшенко Б. А. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости: монография / [Ляшенко Б. А., Соловых Е. К., Мирненко В. І., Рутковский А. В., Черновол М. І.] – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.

8 Марочник стали и сплавов – 2014. Режим доступу: <http://www.splav-kharkov.com>, вільний. – Загл. з екрану. (03.02.2013).

9 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 ПМ – 2016: тези доп. та виступів міжнародна наук.-техн. конф. (Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р.). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – С. 312-314.

10 Ткач М. Я. Оптимізація технологічного процесу вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування замкових різьбових з'єднань бурильної колони / М. Я. Ткач // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2014. – № 3(21). – С. 59-63.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
14.11.17*

*Рекомендована до друку  
професором Чудиком І.І.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Воробйовим О.М.  
(Національний університет оборони України  
імені Івана Черняховського, м. Київ)*