

ОЦІНКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ВАКУУМНИМ ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНИМ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ

¹Б.О. Чернов, ²В.І. Мірненко, ²М.Я. Ткач

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090, e-mail: public@pung.edu.ua

²НУОУ ім. Івана Черняхівського, 03149, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 28, тел. (044) 2710596, 2710600

На основі аналізу результатів промислових досліджень показано, що основними причинами аварій з бурильними колонами у процесі буріння свердловин є корозійно-втомне руйнування її елементів. Удосконалено метод зміцнення поверхні елементів бурильної колони вакуумним газотермоциклічним азотуванням та розроблено технологію процесу зміцнення. Наведено методику експериментальних досліджень та конструкції досліджуваних стендів. Проведено оптимізацію процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів. Досліджено характер розвитку тріщин при втомі. На основі проведених експериментальних досліджень зразків зі сталі 40ХН одержано значення межі витривалості. Встановлено, що використання даного методу зміцнення призводить до підвищення циклічної міцності зразка зі сталі 40ХН до 40%.

Ключові слова: бурильна колона, свердловина, межа міцності, азотування.

На основе анализа результатов промышленных исследований показано, что основными причинами аварий с бурильными колоннами в процессе бурения скважин является коррозионно-усталостное разрушение ее элементов. Усовершенствован метод упрочнения поверхности элементов бурильной колонны вакуумным газотермоциклічним азотированием и разработана технология процесса укрепления. Приведены методика экспериментальных исследований и конструкции исследуемых стендов. Проведена оптимизация процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий. Исследован характер развития трещин при усталости. На основе проведенных экспериментальных исследований образцов из стали 40ХН получено значение предела выносливости. Установлено, что использование данного метода укрепления приводит к повышению циклической прочности образца из стали 40ХН до 40%.

Ключевые слова: бурильная колонна, скважина, предел прочности, азотирование.

Based on the analysis of industrial research it was shown that the main reason of drilling strings accidents in the process of well drilling is corrosion fatigue of its elements. We improved the method of surface strengthening of the drilling string elements by vacuum gas-and-thermal-cycle ionic plasma nitration and developed the strengthening process technology. The methodology for conducting experimental studies and constructions of the test benches were presented. Optimization of the process of vacuum plasma covering application was carried out. Also, we studied the nature of fractures development caused by fatigue. Based on the conducted experimental studies of the steel 40ХН samples we received the index of fatigue strength and found out that utilization of this strengthening method leads to an increase of the cyclic strength of the steel 40ХН sample by 40%.

Key words: drilling string, well, fatigue strength, nitration.

Актуальність роботи. При бурінні нафтових і газових свердловин значна кількість аварій відбувається за рахунок руйнування різьбових з'єднань елементів бурильних колон від дії знакозмінних згинальних навантажень [1-4]. Досвід експлуатації бурильної колони свідчить, що більшість причин руйнування її елементів, в тій чи іншій мірі пов'язано з їх циклічною міцністю, яка виражається в поступовому накопиченні пошкоджень у матеріалі в умовах одночасного впливу змінних навантажень та агресивного середовища. Це призводить до виникнення тріщини від втоми її розвитку та остаточного руйнування.

Крім цього, авторами [2, 3] встановлено, що різьбові з'єднання бурильних і обважнених бурильних труб, корпусів і валів турбобурів руйнуються в результаті втоми матеріалу. Експериментальні й промислові дослідження підтверджують втомний характер руйнувань різьбових з'єднань.

Таким чином, зміцнення поверхні елементів бурильної колони є необхідною умовою, яка підвищить їхню живучість та збільшить терміни їх експлуатації.

Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору втомі елементів конструкцій є використання вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування (ВГТЦПА). Проте незважаючи на неадитивну дію змінних навантажень, як руйнівного фактору, вплив зміцненого шару ВГТЦПА на опір багатоциклової високочастотній втомі сталі 40 ХН не вивчено. Аналіз останніх досліджень та публікацій показує про відсутність узагальнюючих висновків та рекомендацій, які використовувалися хоча б для їх практичного застосування. Так, деякі автори обмежуються констатацією впливу зміцненого шару на величину σ_{-1} [7], інші спостерігають зниження цієї характеристики в одному випадку або її незмінності в другому [8], треті

вказують на підвищення опору втомі за рахунок технологічних процесів або “дійсного його покращення”[9]. Положення, що склалося таким чином, з одної сторони є нормальним через існуючі розбіжності в початкових цілях й концепціях, методиках, умовах й способах інтерпретації експериментальних результатів різними авторами. Проте, з іншого боку, ці обставини підтверджують актуальність проблеми та необхідності її подальшого вивчення.

Метою статті є оцінка працездатності зміцненого шару сталевих матеріалів вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.

Виклад основного матеріалу дослідження. При проведенні експериментальних досліджень, задачу оптимізації технологічного процесу ВГТЦПА розглянуто як багатофакторну з врахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників. Об’єктивна та повна оцінка умов роботи елементів бурильної колони, виготовлених зі сталі 40ХН, дозволяє в якості критерію оптимізації вибрати межу витривалості (Y_1), В якості керованих факторів вибрано: час дифузійного насичення (X_1), тиск реакційного газу (X_2), склад реакційного газу (X_3), температура газу (X_4) та величина температурного циклу (X_5) (таблиця 1).

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання

№	Чинники	Позначення	Рівні варіювання		
1	Час дифузійного насичення, хв	X_1	90...240		
2	Тиск реакційного газу, Па	X_2	25...250		
3	Склад реакційного газу	X_3	60% Ar +40% N ₂	75% Ar +25% N ₂	90% Ar + 10% N ₂
4	Температура газу, °К	X_4	673	773	873
5	Величина температурного циклу, °К	X_5	25...125		

В якості експериментального обладнання використано установку ВПА-1, яка розроблена в Інституті проблем міцності НАН України (рис. 1).

Дана установка має автоматизовану систему управління та дозволяє реалізувати новий принцип формування зміцненого азотованого шару, а саме в імпульсному газотермоциклічному режимі (рис. 2). При такій організації процесу відбувається поєднання переваг подавання на вхід вакуумної установки для азотування пульсуючого струму з високою напругою



Рисунок 1 – Загальний вигляд установки ВПА-1

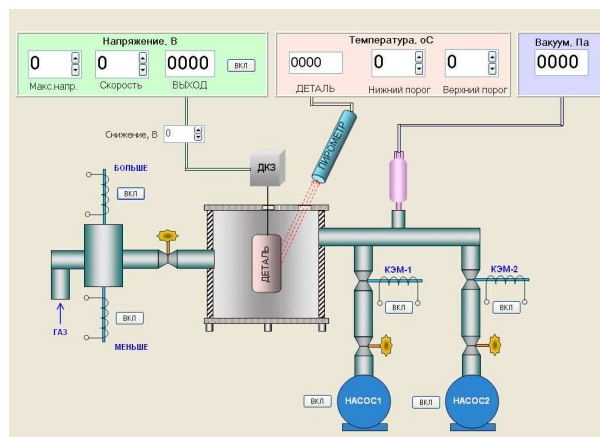


Рисунок 2 – Дисплей автоматизованої системи контролю та управління технологічним процесом ВГТЦПА

та періодичного чергування циклів насичення та розсмоктування азоту як за насичуючою здатністю атмосфери, так і за температурою.

Формування зміцненого поверхневого шару ВГТЦПА на сталевих зразках здійснювалося згідно з планом експерименту, який згенеровано на основі ЛП_r-чисел (всього 16 модифікацій) (таблиця 2). Для дослідження використовувалися зразки зі сталі 40ХН, що є конструкційним матеріалом для елементів бурової колони.

На основі одержаних результатів проводилось формування зміцненого поверхневого шару та експериментальні дослідження на багатоциклової втому.

Довжина зразка розраховується за формулою:

$$l = \sqrt{\frac{d}{f}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

де d – товщина зразка;
 f – резонансна частота;
 E – динамічний модуль пружності;
 ρ – густина матеріалу зразка.

При дослідженні зразків на втому використовували третю форму коливань (рис. 4). База випробувань на втому $N=10^7$ циклів навантаження.

Таблиця 2 – План експерименту в натуральних координатах

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

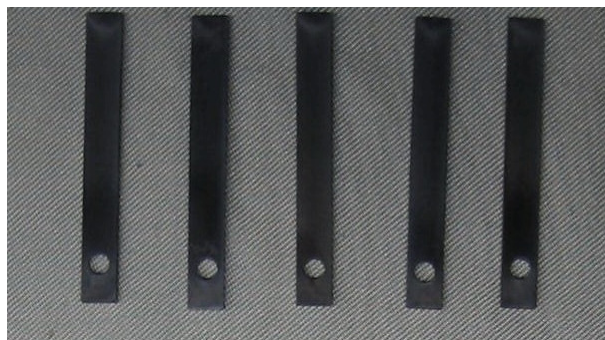


Рисунок 3 – Загальний вигляд зразків із зміцненим поверхневим шаром

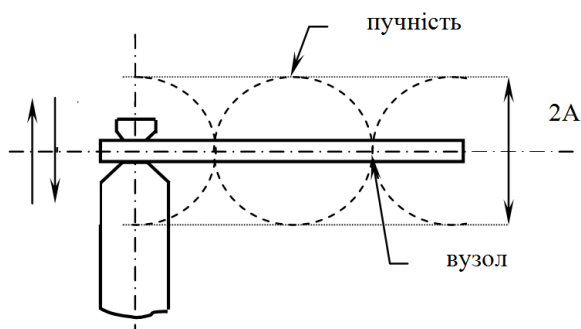
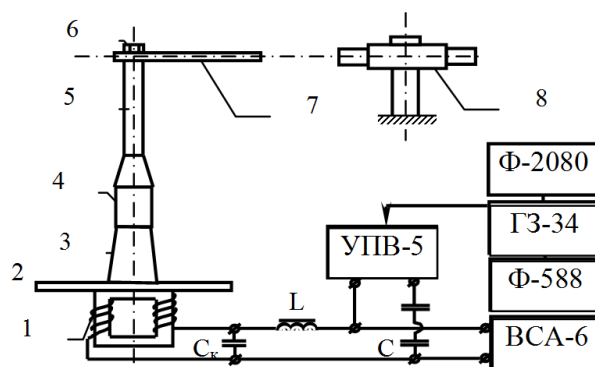


Рисунок 4 – Схема випробування зразків на втому

Для визначення опору втомі зміцнених ВГТЦПА зразків та побудови кривої втомі досліджували не менше 10...15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування, при цьому амплітуду коливання зразка та частоту навантаження на протязі всього часу дослідження підтримували постійною. Момент початку руйнування зразка встановлювали за падінням резонансної частоти його коливань на 10...15 Гц.

Дослідження зразків зі сталі 40ХН, зміцнених ВГТЦПА, проводилися на магнітострикційній установці (рис. 5).



1 – вібратор; 2 – концентратор; 3 – фланець; 4 – накидна гайка; 5 – напівхвильовий концентратор; 6 – гайка; 7 – зразок; 8 – мікроскоп

Рисунок 5 – Схема магнітострикційної установки

Блок-схема установки показана на рис. 4. Робоча частота установки, при якій можливе її використання для випробувань на втому, лежить у межах ~9,8...10,8 кГц.

Принцип дії вібратора 1 установки засновано на використанні явища магнітострикції, що полягає в здатності деяких матеріалів (нікель, пермендіум та інші) змінювати свої лінійні розміри під дією змінного магнітного поля. В установці магнітострикційний ефект реалізується використанням О-подібних нікелевих пластин (товщиною 0,1 мм), що зібрані у пакет, який і є вібратором 1. Змінне магнітне поле вібратора створюється пропусканням через його обмотку змінного струму, частота якого дорівнює робочій частоті установки; обмотка служить також для збудження у пакеті постійного магнітного потоку, що підмагнічує.

Охолодження вібратора, що нагрівається при роботі в результаті втрат на гістерезис і вихрові струми, а також унаслідок нагрівання його обмоток струмом, проводиться проточною водою – вібратор знаходиться в герметичному баку, який прикріплений до опорної плити установки.

Амплітуда коливань вібратора максимальна на його торцях (пучності переміщень) і дорівнює нулю посередині (вузол). Для збільшення амплітуди застосовується концентратор 2 – напівхвильовий стержень змінного перетину із фланцем 3, що розташований у вузловому перетині стрижня. Фланець використовується для кріплення концентратора і всієї коливальної системи до опорної плити. Збільшення амплітуди коливань системи обумовлюється відношенням площ торців концентратора, формою утворюючої й хвильовим опором матеріалу. Комбінуючи ці параметри, можна домогтися істотного збільшення амплітуди коливань (у 8...12 разів) при передачі приймачу коливань (зразку) приблизно тієї ж потужності. На установці використано концентратор із сталі 45 з утворюючою по катеноїді (крива $y=chx$) за ви-

нятком ділянки, що безпосередньо прилягає до вібратора (нижче фланця), що представляє собою циліндр. Діаметр торців концентратора 2 рівні 24 мм і 120 мм. Для подальшого збільшення амплітуди коливань із концентратором 2 за допомогою накидної гайки 4 з'єднаний ще один напівхвильовий концентратор 5, який конструктивно виконаний у вигляді двоступінчастого циліндричного стрижня з титанового сплаву ОТ4. Кожна зі ступеней його має постійний перетин із діаметром верхньої частини 7,5 мм і нижньої – 24 мм. Сполучення між ступенями виконано у вигляді радіусного переходу, тому, як це і повинно бути відповідно до розрахунку, довжина нижньої частини коротша верхньої. Загальну методику розрахунку концентратора з різним законом зміни їх утворюючих подано в роботі [12]. Із застосуванням додаткового східчастого концентратора максимальна амплітуда коливань на крайньому торці системи досягає порядку 200 мкм, що виявилося цілком достатнім для успішного проведення випробувань на втому.

Електрична частина установки складається з генератора типу ГЗ-34, лічильника циклів Ф-588, частотоміра Ф-2080, джерела постійного струму – вирівнювача ВСА-6.

На магнітострикційній установці при дослідженнях на втому здійснюється незалежне збудження коливань системи, так, що частота їх визначається настроюванням генератора, що задає, і вимірюється електронним частотоміром.

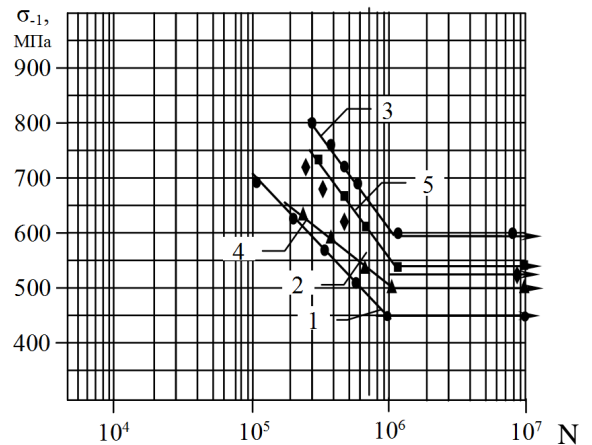
Необхідна амплітуда коливань зразка 7, що закріплюється на торці концентратора 5 за допомогою гайки 6, установлюється шляхом зміни вихідної напруги звукового генератора, що подається на могутній підсилювач. Узгодження вихідного трансформатора могутнього підсилювача УПВ-5 із вібратором вироблялося шляхом підбору оптимального числа витків обмотки вібратора за умови одержання максимальної амплітуди коливань вібратора. Включення дроселя L і ємності C та допусає паралельне з'єднання могутнього підсилювача, джерела постійного струму й обмотки вібратора. Ємність C_k включається паралельно обмотці вібратора, так, що в контурі “ L_k - індуктивність вібратора” має місце резонанс струмів, чим поліпшуються умови узгодження вібратора з могутнім підсилювачем.

Величина сили струму підмагнічування задавалася близько 15 А при напрузі 2...3 В.

Для виміру амплітуди коливань зразка 7 у процесі дослідження використовується мікроскоп 8 із набором об'єктивів і окулярів. Знижуючи чи підвищуючи амплітуду коливань, при визначеному числі циклів навантаження установлюється необхідний для руйнування зразків від втоми рівень напруг. Зв'язок між амплітудою будь-якої точки коливного зразка і напругами, що діють у ньому, установлюється (залежно від виду коливань, їхніх форм, конструкції зразка) шляхом відповідних розрахунків на основі теорії коливань.

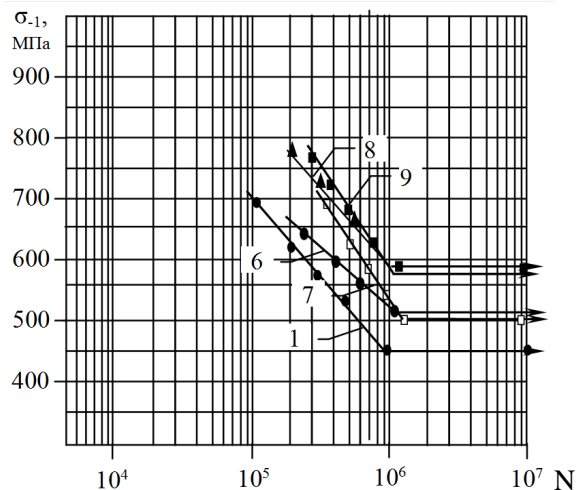
В результаті проведення експериментальних досліджень одержано значення межі ви-

тривалості зразків зі сталі 40 ХН із зміцненим поверхневим шаром, сформованим ВГТЦПА (рис. 6 – 9). Усі варіанти формування (див. табл. 2) зміцненого шару підвищують σ_{-1} .



1 – без зміцнення;
2-5 – із зміцненням згідно плану експерименту

Рисунок 6 – Криві втоми сталі 40ХН



1 – без зміцнення;
6-9 – із зміцненням згідно плану експерименту

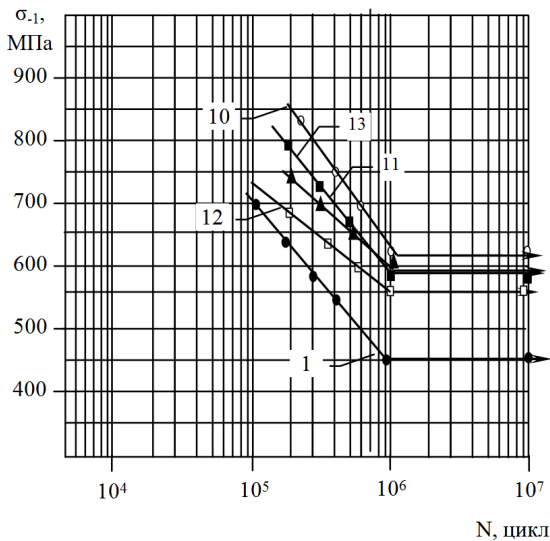
Рисунок 7 – Криві втоми сталі 40ХН

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, який характеризує межу витривалості сталі 40ХН зі зміцненим поверхневим шаром ВГТЦПА, від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Розрахунок моделі здійснювався за допомогою пакету прикладних програм “ПРІАМ”. В якості початкових даних використовувалися матриця планування експерименту та результати експериментальних досліджень.

Після обробки результатів експерименту отримана математична модель, що описує залежність межі витривалості від конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників.

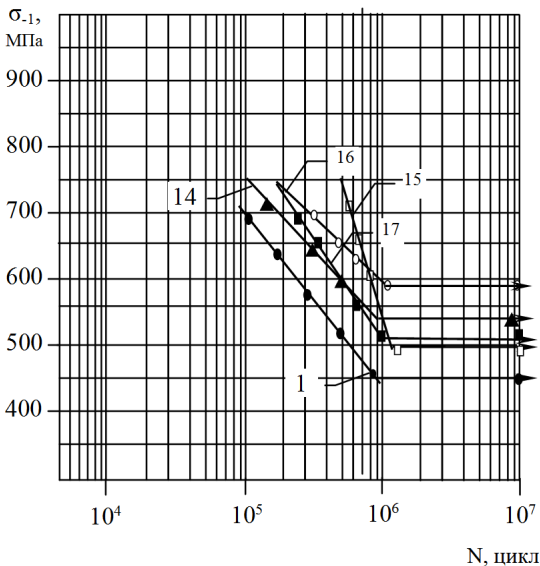
$$Y = 554,961 + 321,398x_1^2 x_2^2 x_3 x_5^2 + 14,4129x_4 + 39,8087x_1 x_4 x_5;$$

де Y – математична модель у кодованих значеннях для межі витривалості σ_{-1} .



1 – без зміцнення; 10-13 – із зміцненням згідно плану експерименту

Рисунок 8 – Криві втоми сталі 40ХН



1 – без зміцнення; 14-17 – із зміцненням згідно плану експерименту

Рисунок 9 – Криві втоми сталі 40ХН:

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 0,0142815(X_1 - 160,604) ; \\
 x_1^2 &= 1,64458(X_1^2 - 0,0191164X_1 - 0,372824) ; \\
 x_1^3 &= 3,31219(X_1^3 - 0,0582365X_1^2 - 0,654433 X_1 + 0,0145849) ; \\
 x_2 &= 0,0100246(X_2 - 136,182) ; \\
 x_2^2 &= 1,56832(X_2^2 - 0,0387083X_2 - 0,34791) ; \\
 x_2^3 &= 3,195(X_2^3 - 0,0147624X_2^2 - 0,663917 X_2 - 0,08331) ; \\
 x_3 &= 1(X_3 - 1) ; \\
 x_3^2 &= 1,6(X_3^2 - 0,625) ; \\
 x_4 &= 0,00941176(X_4 - 766,75) ; \\
 x_4^2 &= 1,64632(X_4^2 - 0,0907563X_4 - 0,605536) ; \\
 x_5 &= 0,0227556(X_5 - 74,8047) ; \\
 x_5^2 &= 1,55962(X_5^2 - 0,0132701X_5 - 0,354272) ;
 \end{aligned}$$

$$x_5^3 = 3,1495(X_5^3 - 0,00418042X_5^2 - 0,675089X_5 - 0,00322023) ,$$

де X_1, X_2, X_3, X_4 та X_5 – конструктивні, технологічні та експлуатаційні чинники.

Для визначених чинників проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує межу витривалості сталі 40ХН із зміцненим поверхневим шаром ВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 10 – 11).

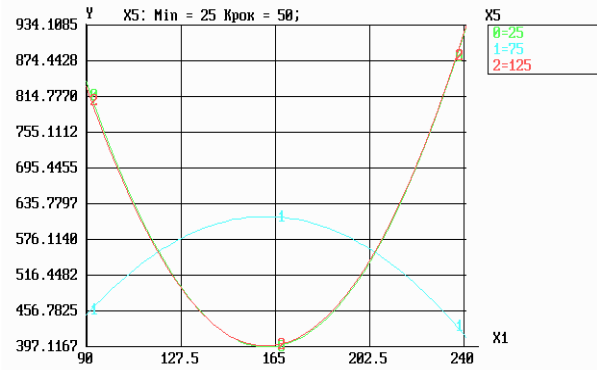


Рисунок 10 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y = f(X_1, X_5)$

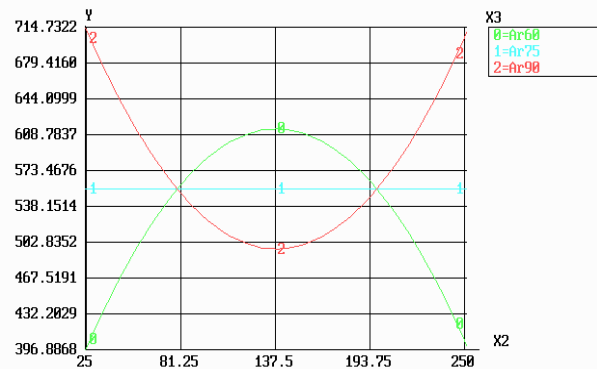


Рисунок 11 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y = f(X_2, X_3)$

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу чинників на значення функції відгуку та визначити те значення чинників, які на протязі всього часу впливу здійснюють найбільший чи найменший ефект.

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, які представлено для межі витривалості на рис. 12 – 15.

Висновки

1. В результаті оцінки працездатності зміцненого шару ВГТЦПА сталі 40ХН, яка є конструкційним матеріалом для елементів буриньної колони встановлено, що використання технологічного процесу ВГТЦПА дозволяє підвищити межу витривалості σ_1 на 20...40%, у залежності від технологічного режиму його формування.

2. Використання ВГТЦПА дозволить підвищити ресурс конструкційних елементів бу-

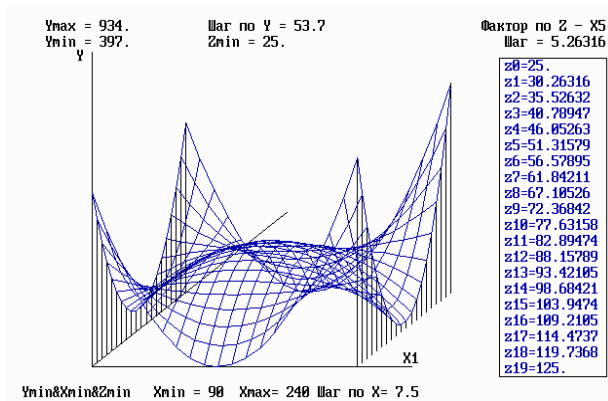


Рисунок 12 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

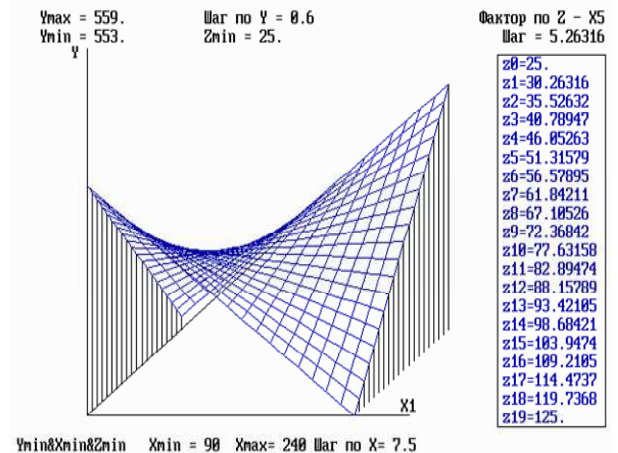


Рисунок 13 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

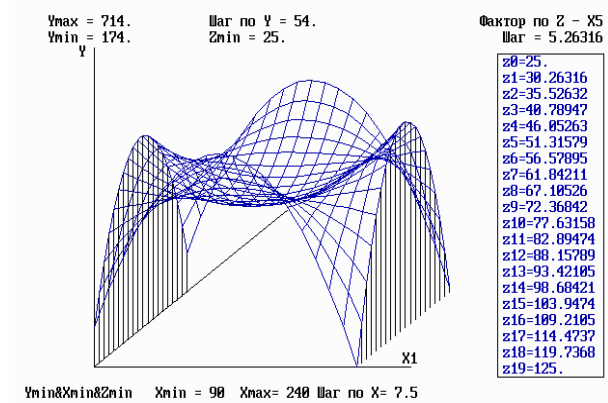


Рисунок 14 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі

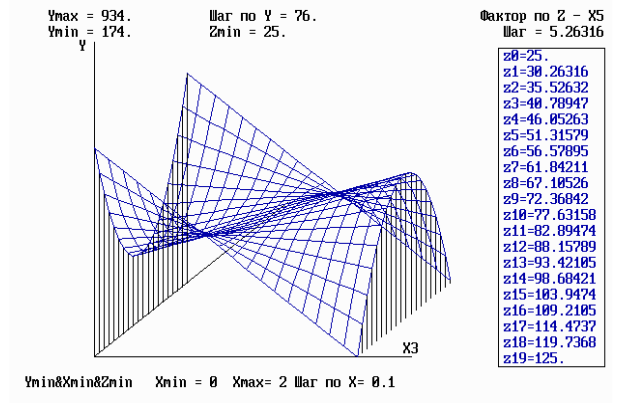


Рисунок 15 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y = f(X_3, X_5)$ в тривимірному просторі

рильних колон, а саме замкових різьбових з'єднань, а також прогнозувати їх довговічність. Це надасть можливість підвищити ефективність роботи бурильної колони, що в свою чергу призведе до зменшення матеріальних затрат при будівництві нафтових і газових свердловин.

Література

- 1 Сароян А.Е. Теория и практика работы бурильной колонны. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
- 2 Чернов Б.А. Методы повышения работоспособности бурильных и обсадных колонн у нефтяных и газовых скважинах: Дисс. докт. техн. наук. – Ивано-Франковск: ИФТУНГ, 1999. – 370 с.
- 3 Чернов Б.О. Підвищення експлуатаційних характеристик бурильних колон шляхом удосконалення конструкцій різьбових з'єднань / Б.О. Чернов, В.Б. Чернов, М.С. Чернова, В.Д. Яцишин, // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №1(38). – С. 91-96.
- 4 Улитин Г.М. Динамика и устойчивость бурильных колонн буровых установок роторного типа. Диссертация на соискание уч. ст. докт. техн. наук. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 321 с.

- 5 Кузьменко В.А. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения – Киев: Наук. думка, 1979. – 336 с.

- 6 Кузьменко В.А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. – 152 с.

- 7 Shiozowa Kazuoki, Ohshima Seiji. Effect of TiN coating on corrosion fatigue strength of carbon steel // Ibid. – 1990. – 39, №442. – P. 958–964.

- 8 Малашенко И.С., Яковчук К.Ю., Корсакевич Н.И., Рыбников А.И. Циклическая прочность никелевых сплавов с конденсированными покрытиями Me-Cr-Al-Y // Пробл. спец. электротехнологии. – 1987. – №3. – С.41–45.

- 9 Shiozowa Kazuoki, Ohshima Seiji. Effect of TiN coating on fatigue strength of carbon steel // Ibid. – 1990. – 39, №442. – P. 927–932.

Стаття надійшла до редакційної колегії
18.11.14

Рекомендована до друку
професором Івасівим В.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Кунцяком Я.В.
(ПРАТ «НДІКБ бурового інструменту», м. Київ)