

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

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник

Чернов Борис Олександрович

доктор технічних наук, професор

Науковий керівник

Копей Богдан Володимирович

доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ БУРОВИХ КОЛОН.....	14
1.1. Аналіз впливу експлуатаційних факторів на працездатність бурових колон.....	15
1.2. Основні технологічні процеси підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони.....	28
1.3. Підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.....	38
Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження.....	41
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ.....	43
2.1. Основні принципи системного підходу до вирішення проблеми підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони	44
2.2. Експериментальний комплекс для випробування конструктивних елементів бурильної колони за критерієм циклічної міцності границі витривалості.....	52
2.2.1. Магнітострикційна установка для високочастотних випробувань на втому.....	52
2.2.2. Методика високочастотних випробувань на втому	53
2.3. Методика триботехнічних випробувань зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони	58

2.4. Методика дослідження корозійної стійкості конструктивних елементів бурильної колони	60
2.5 Методика втомних випробувань замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині.....	61
2.6. Методики дослідження властивостей зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони.....	63
2.6.1. Дослідження мікротвердості зміцненого поверхневого шару.....	63
2.6.2. Мікрорентгеноспектральний, мікроструктурний та рентгенофазовий аналіз зміцненого поверхневого шару.....	63
2.6.3. Дослідження залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі.....	64
2.7. Методика оцінки напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів з використанням кінцево-елементного аналізу.....	65
Висновки до розділу 2.....	68
РОЗДІЛ 3. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМПУЛЬСНОГО ВАКУУМНОГО ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ.....	70
3.1. Вибір критеріїв оптимізації, керованих факторів та побудова плану експерименту	70
3.2. Удосконалення технологічного процесу формування зміцнених поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони.....	75
3.2.1. Технологічна база вакуумного іонно-плазмового азотування.....	75
3.2.2. Удосконалення технологічного процесу зміцнення поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.....	78

3.3. Удосконалення моделі процесу формування зміцнених поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони	84
3.4. Визначення закономірностей впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцненого поверхневого шару конструктивних елементів бурильної колони	86
3.4.1. Результати дослідження мікротвердості та товщини зміцненого поверхневого шару	86
3.4.2. Визначення механізму зміцнення поверхневого шару.....	91
3.4.3. Результати дослідження залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі	97
Висновки до розділу 3.....	99
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ.....	100
4.1. Триботехнічні випробування зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони.....	101
4.1.1. Результати триботехнічних досліджень.....	101
4.1.2. Побудова математичних моделей за результатами триботехнічних досліджень.....	110
4.2. Дослідження зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони на корозійну стійкість	117
4.2.1. Результати випробувань на корозійну стійкість.....	117
4.2.2. Побудова математичних моделей за результатами випробувань на корозійну стійкість.....	119
4.3. Дослідження зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони на втому	125
4.3.1. Результати випробувань на втому.....	125
4.3.2. Побудова математичних моделей за результатами випробувань на втому.....	129

4.3.3. Фрактографічний аналіз руйнування зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони	135
4.3.4. Аналіз напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони за допомогою методу кінцево-елементного аналізу.....	140
4.4. Результати втомних випробувань замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині.....	146
Висновки до розділу 4.....	147
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ.....	148
5.1. Визначення оптимальних параметрів удосконаленого технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування.....	148
5.2. Розробка алгоритму підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.....	151
5.3. Техніко-економічне обґрунтування впровадження удосконаленого технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування.....	155
5.3.1. Кількісна оцінка працездатності зміцнених замкових різьбових з'єднань бурильної колони.....	155
5.3.2. Економічна ефективність технологічного процесу зміцнення замкових різьбових з'єднань імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.....	157
Висновки до розділу 5.....	163
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
ДОДАТОК А. Акт реалізації.....	
ДОДАТОК Б. Розрахунок економічного ефекту.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БК	– бурильна колона;
БТ	– бурильна труба;
ВПА	– вакуумне іонно-плазмове азотування;
ІВГТЦ ІПА	– імпульсне вакуумне газотермоциклічне іонно-плазмове азотування;
ЗРЗ	– замкові різьбові з'єднання;
ЕІЛ	– електроіскрове легування;
КНБТ	– компоновка низу бурильної колони;
ОБТ	– обважнена бурильна труба;
ПЕОМ	– персональна електронно-обчислювальна машина;
ППД	– поверхнево-пластичне деформування;
ППП ПРІАМ	– пакет прикладних програм “Планування, регресія і аналіз моделей”;
ТБТ	– товстостінна бурильна труба;
ХТО	– хіміко-термічна обробка.

ВСТУП

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 ВІГТЦПА 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 ІВІГТЦПА 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 ІВІГТЦПА 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 багатофакторного 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 – [201, 210]. Матеріали дисертаційної роботи не містять ідей або розробок, що належать співавторам, із якими написані наукові статті. Так, в [1] – проведено

аналіз впливу експлуатаційних факторів на працездатність бурових колон; [3] – оцінено стан проблеми підвищення довговічності замкових різьбових з'єднань бурильної колони ІВГТЦПА; [197] – доведено перспективність використання методу ІВГТЦПА для зміцнення елементів бурильної колони; [198] – проведено аналіз впливу ІВГТЦПА на підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони; [199] – проведено аналіз напружено-деформованого стану зміцненої сталі 40ХН методом ІВГТЦПА за допомогою кінцево-елементного аналізу з використанням програмного забезпечення NASTRAN; [201] – проведено вибір критеріїв оптимізації, керованих факторів, побудовано план експерименту та на основі результатів експериментальних досліджень отримано математичні моделі технологічного процесу ІВГТЦПА; [202] – розкрито технологію ІВГТЦПА та показано її позитивний вплив на підвищення працездатності ЗРЗ БК; [204] – показано вплив ІВГТЦПА на підвищення корозійної стійкості, зносостійкості та границі витривалості ЗРЗ БК; [205] – наведено результати триботехнічних випробувань зміцнених поверхневих шарів ІВГТЦПА; [206] – проведено дослідження на корозійну стійкість зміцнених поверхневих шарів методом ІВГТЦПА та отримано математичну модель технологічного процесу; [207] – проведено аналіз існуючих методів підвищення працездатності ЗРЗ БК та показано, що одним із перспективних методів є ІВГТЦПА; [208] – проведено дослідження зміцнених поверхневих шарів, методом ІВГТЦПА, на втому та отримано математичну модель технологічного процесу; [209] – знайдено оптимальні параметри технологічного процесу ІВГТЦПА; [210] – обґрунтовано економічну ефективність технологічного процесу зміцнення замкових різьбових з'єднань ІВГТЦПА; [211] – 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, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу” ІМ – 2016, м. Івано-Франківськ, 2016 р.

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковані у 9 наукових статтях у провідних фахових наукових виданнях, затверджених ДАК України, із них 6 наукових статей опубліковано у наукових журналах, 2 наукові статті опубліковано у збірниках наукових праць, 1 наукова стаття опублікована закордоном. Додатково матеріали дисертації опубліковано в 6 тезах доповідей на науково-технічних конференціях та в 1 патенті України на корисну модель.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ БУРИЛЬНИХ КОЛОН

Одним із перспективних напрямків розвитку нафтогазової галузі є продовженням ресурсу БК шляхом забезпечення підвищених механічних властивостей БТ на етапі експлуатації для запобігання ускладнень і аварій при бурінні свердловин [1 – 3].

Проблема забезпечення працездатності БК в процесі експлуатації залишається актуальною. Як показує практика, аварійність БК, зумовлена здебільшого втомним зруйнуванням ЗРЗ незалежно від досконалості і рівня розвитку технології буріння.

Однією з проблем нафтогазової галузі науки є проблема науково-обґрунтованого вибору та впровадження перспективних та більш ефективних технологічних процесів створення зміцнених поверхневих шарів для підвищення працездатності ЗРЗ БК. Вирішенням проблеми є застосування вакуумних технологій де найбільшого інтересу заслуговує метод ІВГТЦПА.

В розділі проведено аналіз стану та експлуатації ЗРЗ БК, а також визначено вплив факторів на характеристики конструкційного матеріалу та проведено огляд літературних джерел.

Результати аналізу дозволять:

- виявити ті проблемні питання, які в процесі виготовлення та експлуатації ЗРЗ БК залишилися невирішеними, і, таким чином, визначити своє місце у вирішенні наукового завдання;
- визначити особливості технологічних процесів та встановити найбільш ефективний технологічний процес для зміцнення ЗРЗ БК;
- визначити мету, об'єкт, предмет дослідження;
- формулювання завдань дослідження.

1.1 Аналіз впливу експлуатаційних факторів на працездатність бурових колон.

При бурінні свердловин глибиною до 4000 м труби виконують 500...550 тис. м. зворотно-поступальних рухів і 1500 тис. м. обертань. Такий великий обсяг робіт веде до виникнення ускладнень та аварій при бурінні свердловин, серед яких найбільша їх кількість відноситься до аварій обсадних колон і аварій елементів бурильної колони. (табл. 1.1). На ліквідацію їх витрачається більше 10% часу, що витрачається на ліквідацію аварій всіх типів. При цьому вартість труб в загальній вартості бурового устаткування становить близько 60% [1].

Таблиця 1.1 – Розподіл аварій за видами [12]

№ з/п	Види аварій	Кількість аварій, шт.	Співвідношення у %
	Прихвати бурильних і обсадних колон	470	40,59
	Аварії з обсадними колонами	327	28,24
	Аварії з елементами бурильної колони	135	11,66
	Інші аварії	102	8,81
	Аварії з забійними двигунами	68	5,87
	Аварії з долотами	30	2,59
	Аварії через невдале цементування	13	1,12
	Падіння в свердловину сторонніх предметів	13	1,12
	Усього аварій	1158	100

Результати дослідження великої кількості аварій з трубами показують, що руйнування труб зазвичай носить втомний характер. Явища втоми у трубах виникають у результаті дії змінних навантажень, до яких відноситься змінний згин, крутильний удар і коливання бурильної колони. Основний фактор, що приводить до утворення змінних напруг, знакозмінний згин, що виникає при обертанні колони.

Аналіз аварійності з бурильними трубами показав, що при роторному бурінні 85...90% аварій відбувається з різьбовими з'єднаннями бурильних труб, бурильних замків (рис.1.1) та інших елементів колони (табл. 1.2). Встановлено, що аварії з трубами відбуваються в основному внаслідок зламу або зриву різьби.



Рисунок 1.1 – Бурильний замок ЗН – 108 (ГОСТ – 5286-75) [4]

При роторному бурінні часто зустрічається руйнування труби у різьбовому з'єднанні у потовщеному місці, що становить 60...70% від загального числа аварій. В окремих випадках число це доходить до 90%. Зрив різьби відбувається внаслідок деформації руйнування різьбового з'єднання через зношування різьби, розмиву різьбового з'єднання промивною рідиною, заїдання різьби (рис. 1.2) [3].

При турбінному бурінні кількість зламів доведено до мінімуму, і вихід труб з ладу відбувається, як правило, через зношення різьбових з'єднань, а також розмив різьб і тіла труб.

Таблиця 1.2 – Аварії бурильних колон в роторному бурінні [17]

/п	Назва аварій	Співвідношення у %
	Злам бурильних труб по довжині	9,5
	Злам бурильних труб у потовщених кінцях	46,8
	Зрив бурильних труб по 8-ниткової нарізці	11,2
	Злам бурильного замка	4,2
	Зрив різьбового з'єднання бурильного замка	9,6
	Злам і зрив різьбового з'єднання важкого низу	10,5
	Злам труб, перевідників і зрив по різьбі	8,2

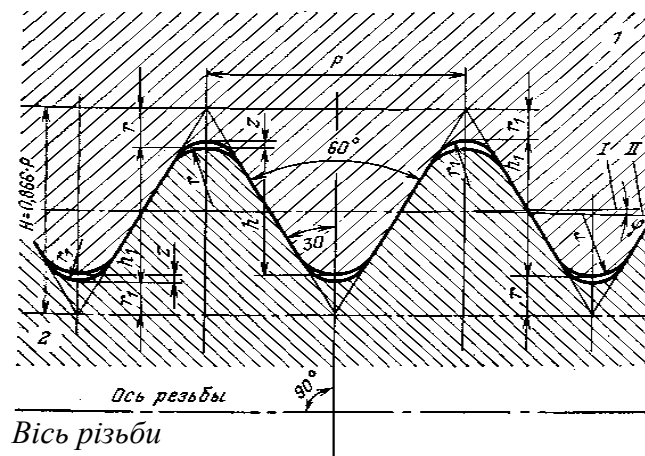


Рисунок 1.2 – Розмив різьбового з'єднання та тіла труби

Таким чином, при бурінні і освоєнні нафтових і газових свердловин важливими елементами, які значною мірою визначають надійність бурильних і обсадних труб, є різьбові з'єднання. Експлуатаційні характеристики конічних різьбових з'єднань труб, значною мірою впливають на технічні показники буріння і економічну ефективність будівництва свердловин. Вирішення цих питань неможливе без впровадження сучасних технологічних процесів зміцнення труб та вивчення закономірностей зміни механічних характеристик різьбових з'єднань, які багато в чому залежать від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів.

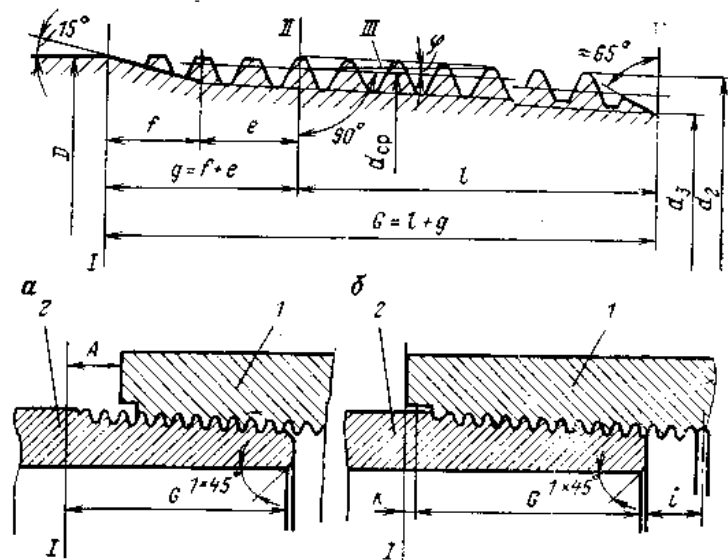
На основі аналіз умов роботи конічного з'єднання замкових бурильних труб встановлено, що елементи бурильної колони кріпляться між собою за допомогою замкових з'єднань, що складаються з ніпеля і муфти, забезпечених конічною замковою різьбою (рис. 1.3). При скручуванні ніпель замку бурильної свічки входить в муфту колони бурильних труб, що утримуються на роторі, з деяким осіданням, завдяки чому забезпечується самоцентрування замкового з'єднання. Процес скручування здійснюють за допомогою механічного ключа, що забезпечує силове обертання ніпеля замку відносно нерухомої муфти. При цьому контактні поверхні різьби відчують осьове навантаження від маси підвішеної бурильної свічки, а при розкручуванні – від натягу пружини підйомного крюка (рис. 1.4). Таким чином, процес скручування-розкручування замка ускладнюється осьовими навантаженнями, що діють дискретно в протилежних напрямках. Це істотно ускладнює процес тертя і сприяє прискоренню зносу профілю різьби, ослабленню натягу та зменшення параметра просадки, що знижує ресурс роботи замка труб.

Зараз недостатньо обґрунтовані кількісні критерії зносу бурильних труб та їх елементів, зокрема замків. При зносі їх зовнішньої поверхні зменшується площа торців. При цьому величина осової сили в різьбовому з'єднанні замка зменшується, і це призводить до зниження щільності стику, тобто до недостатньої закріпленості ніпеля замка в його муфті.



1 – муфта; 2 – бурильна труба.

Рисунок 1.3 – Профіль різьби бурильних труб і муфт до них [26]



а – з'єднання, що скручене вручну;

б – з'єднання, що скручене на станку.

Рисунок 1.4 – Різьбове з'єднання бурильних труб [26]

Тоді, під впливом робочих навантажень і вібрацій виникають умови для часткового зсуву або зміщення деталей в різьбовому з'єднанні, зниження щільності якого інтенсифікує зношення різьби, аж до початку розкриття стику. Далі слідує розмив різьби і обрив інструменту, що є складною аварією і вимагає зупинки буріння для ліквідації її наслідків. Тут слід зазначити, що весь процес розвитку розглянутої аварійної ситуації в стовбурі свердловини протікає приховано, візуальному контролю не піддається і є некерованим до моменту зламу. Механізм розвитку розмиву різьби пояснюється тим, що внутрішній канал бурильної колони містить внутрішні кільцеві риски, які утворюються при скручуванні двох торців труб. При перебігу потоку в області цих рисок утворюються місцеві завихрення, які ініціюють особливу вихрову взаємодію абразивних частинок потоку з краями риски. За певних режимах течії це взаємодія досягає критичних значень, при яких структура металу піддається абразивному руйнуванню. Процес інтенсифікується, якщо щільність натягу стикового з'єднання знизилася нижче допустимої з яких-небудь причин (недозакручення різьби та її дефекти, зовнішній знос замку, особливо односторонній і т.д.). Ослаблення натягу викликає зсув різьби та

утворення мікрозазорів між торцевими поверхнями замку, що загрожує в кінцевому результаті розмивом різьби і руйнуванням замкового з'єднання [2].

Таким чином, збереження і підтримка в процесі експлуатації якості різьби замкових з'єднань є необхідною умовою забезпечення їх нормативного натягу для запобігання зношування на межах замкових стиків.

Враховуючи умови роботи кінцевого з'єднання замкових бурильних труб для запобігання ускладнень і аварій при бурінні свердловин на кожному з етапів робіт здійснювалися спроби вдосконалення процесу будівництва свердловини та підвищення ступеня її експлуатаційної надійності.

Основні зусилля були спрямовані, на розробку технологічних та організаційно-технічних заходів, що включають в себе: підвищення працездатності замкової різьби та якості змащуючих речовин; раціональне відпрацювання ЗРЗ у комплекті бурильних труб; застосування ефективних протизадирних покриттів після ремонту різьби; впровадження нормативних показників відпрацювання ЗРЗ, що відповідають умовам експлуатації.

Характерною причиною зниження працездатності є зношування різьби в замкових з'єднаннях, а саме у результаті молекулярно-механічне зношування [5]. Такий вид зношування характерний, наприклад, для трубної різьби, нарізаної на кінцях бурильних труб. Після накручування бурильного замка (ніпеля або муфти) в різьбовому з'єднанні виникають пружні деформації натягу та контактний тиск в зоні сполучення витків різьби. При циклічних згинах замку контактні зони різьби зазнають зусилля зсуву витків відносно один одного. Ці зусилля характеризуються тертям під напругою, механізм якого включає пластичне згладжування нерівностей в зоні тертя. При цьому виникає дроблення структуроутворюючих зерен металу; їх розпушення із зародженням субмікрозазорів і розвитком нових поверхонь, що деформують первинну форму витків та веде до зниження щільності натягу різьби. Поява мікротріщин на витках різьби служить речовим проявом втомної деформації. При цьому, тріщини виникають на дні різьбової канавки, як це спостерігається при механічній втомі, а на лінії контакту вершини витка із зустрічною

впадиною. Через особливості геометрії різьби ця контактна лінія розташовується вище дна впадини, будучи концентратором напружень і акумулятором структурних дефектів. Розвиваючись в мікро- і макротріщини, вони сприяють відділенню від тіла труби різьбового витка і його подальшому зминанню зі зломом і ослабленням щільності натягу різьбового з'єднання в цілому.

Одним з методів спрямованих на підвищення ресурсу різьбових з'єднань є: централізовані системи якості калібрів для різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту [6]; експериментальні дослідження замкових з'єднань зі зношеною різьбою на втому і статичну міцність [7]; оперативний контроль ступеня зносу різьби і від'ємного натягу замкового з'єднання [8]; підвищення опору втоми ЗРЗ обважнених бурильних труб великого діаметру [9]; аналітична оцінка статичної міцності замкового з'єднання зі зношеною різьбою [10]; визначення ресурсу ЗРЗ при багаторазовому скручуванні [11]; застосування протизадирних, з вмістом міді, покриттів замкової різьби бурильних труб [12]; оптимізація технологій зміцнення замкової різьби [13]; проектування високогерметичних різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб за допомогою кінцево-елементного аналізу [14]; аналіз герметичності замкового з'єднання при статичному навантаженні з урахуванням ступеня зносу різьби [15]; визначення граничного осьового навантаження розтягу на бурильний замок з умови герметичності з'єднання [16].

Одним з основних експлуатаційних характеристик, що визначають працездатність ЗРЗ бурильної колони, є також герметичність, яка істотно залежить від якості збирання замкових деталей і дії зовнішніх силових факторів (осьового розтягування і згину). Якість збірки ЗРЗ визначається заданим напруженим станом упорного торця замкових деталей, отриманих в результаті машинного скручування з'єднання. Встановлено, що у міру зношування замкової різьби для забезпечення заданої герметичності з'єднання необхідно збільшувати момент згвинчування. Для досягнення однакової

герметичності замкових з'єднань з різним ступенем зносу різьби, за інших рівних умов, співвідношення крутних моментів згвинчування має відповідати відношенню параметричних коефіцієнтів.

З наведеного в [17] аналізу аварійних руйнувань елементів бурильних колон очевидно, що руйнування носять, в основному, втомний характер, що відбувається переважно в різьбових з'єднаннях і становить 60% всіх аварій з бурильної колоною. Аналіз аварій з бурильними трубами показав, що з усієї кількості руйнувань (406 аварій) 23% відбулося по трубній різьбі, 31% – по з'єднаннях УБТ, 4,5% – по ніпельній частині бурильних замків т.д. Практика експлуатації забійних двигунів також вказує на недостатню надійність деяких типів їх різьбових з'єднань. Так, за даними [18] довговічність, корпусу і вала турбінної секції турбобурів склала 700...800 год., а корпусу і вала шпинделя – 450...600 год..

Окрім цього, відмічено той факт, що аналіз результатів експлуатації елементів бурильної колони за кордоном дає аналогічну картину. Так в компанії Norsk-Hydro за рік сталося 11 аварій пов'язаних з руйнуванням різьбових з'єднань бурильної колони [18]. Слід зазначити, що всі вони сталися в нижній частині бурильної колони нижче її нейтрального перерізу при бурінні вертикальних свердловин. Аварійним руйнувань в основному піддавалися ОБТ діаметрами 311 і 203 мм, ТБТ діаметром 165 мм і стабілізатори по ЗРЗ. Було відзначено, що деякі руйнування відбувалися при інтенсивній вібрації бурильної колони при швидкості її обертання близькою до резонансної частоти.

Розподіл руйнувань у відсотках за елементами бурильної колони було наступним: УБТ – 47%, вібратори – 16%, перехідники – 16%, ТБТ – 6%, стабілізатори – 6%. Велика частина (85%) руйнувань УБТ відбувалася по муфтовій частині з'єднань 65/8 Reg УБТ-203. Більшість руйнувань відбувалося у верхній частині КНБК в місці сполучення 203 і 241 мм УБТ, а також ДУБТ.

Проведений автором [18] аналіз умов експлуатації ЗРЗ при бурінні глибоких свердловин в Італії компанією Agip також показав їх низьку

працездатність – до 100 руйнувань на рік. При бурінні вертикальних свердловин глибиною до 7000 м роторним способом руйнування відбуваються в нижній частині БК.

При бурінні часто зустрічаються дуже тверді породи, які розбурюються зі швидкістю до 0,3 м/год. Сумарна маса бурильної колони досягає 150 т, навантаження на долото при бурінні свердловин діаметром 216 мм – 12...15 т, швидкість обертання – 100...120 хв⁻¹, тиск бурового розчину – до 30 МПа.

Вивченню фактичних динамічних навантажень, що діють на бурильну колону в свердловині, присвячений цілий ряд робіт [19] так само як і з дослідженням, їх впливу на працездатність різьбових з'єднань бурильних труб, УБТ і забійних двигунів [20 – 25]. Більшість, дослідників вказують на те, що повний спектр циклічних навантажень, що діють на БК, надзвичайно різноманітний, і їх точний облік практично неможливий.

У роботах Є. І. Крижанівського [26] висвітлені питання напруженого стану ЗРЗ при навантаженні їх згином, а також значенням осевого натягу ЗРЗ, що робить істотний вплив на збільшення напруг, що розтягують від зтяжки в ніпелі, що знижує витривалість з'єднання в цілому.

У працях Я.Б. Шлімака зроблені дослідження в галузі міцності матеріалу замків і їх довговічності. Ним відзначено, що при виготовленні замків застосовувалася сталь марки 40ХН, окрім своєї дефіцитності, вона не задовольняє вимогам, що пред'являються до замків в частині забезпечення їх довговічності.

Роботи І. М. Расулова присвячені аналізу промислових даних про вихід з ладу замкових з'єднань в результаті значного зносу при їх скручуванні і розкручуванні. Згідно виробленого ним аналізу випливає, що в існуючій практиці замкові деталі виводяться з експлуатації через знос різьби передчасно: ресурс по зносу замкових різьб використовується не повністю. І в основному знос замкових різьб при спуско-підйомних операціях відбувається по бічних сторонах профілів різьб і, як вперше їм досліджено, по вершинах зрізу.

Дослідженню питання підвищення зносостійкості замкового різьбового з'єднання присвячені роботи [27 – 31]. Однак зараз немає ще єдиної думки про основний механізм зношування упорних поверхонь замків взагалі і бічного профілю різьби зокрема.

Одні фахівці вважають переважаючим втомне зношування, інші – абразивне, а треті кажуть про можливе їх поєднанні з переважною роллю одного з них [32].

Мастильне середовище, в якій працює різьбове з'єднання, в разі потрапляння промивної рідини, характеризується корозійною та абразивною агресивністю. Обидва ці фактори і кожен взятий окремо знижують працездатність ЗРЗ, визначаючи при цьому знос в процесі роботи. Дія цих факторів проявляється по різному: корозійне середовище сприяє зниженню втомної міцності, абразивність промивної рідини призводить до збільшення темпу зношування деталей (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Корозійне пошкодження елементів бурильної колони

Вплив вмісту абразиву на працездатність різьбового сполучення також велика і збільшує ступінь зносу порядку на 30%, як і хімічна активність, але при певних концентраціях. При низькому рівні абразивності переважаючим залишається процес втомного руйнування. В цьому випадку дія абразивного компонента може грати навіть позитивну роль, так як абразивні частки вирівнюють поверхню витків різьби, зменшуючи при цьому концентрацію

напружень [31, 33, 34]. При високому (понад 4 мас.%) рівні абразивності промивної рідини абразивне зношування переважає над втомним [32, 33]. Об'ємний вміст абразивних часток у промивній рідині, що потрапляє в мастило, у більшості районів буріння зазвичай коливається в межах 0,5: .. 3,0 мас. % за об'ємом [32] хоча згідно з вимогами, що пред'являються до промивних рідин, це число не повинно перевищувати 2,0 мас. % [35, 36]. Ці дані узгоджуються з даними в роботі, де на підставі аналізу 105 проб взятих з трьох родовищ було отримано, що при бурінні на воді вміст абразиву в межах 1,1 1,6 мас. % за об'ємом, а при бурінні на технологічному розчині – 2,2 ... 3,8 мас. %. На підставі вищевикладеного можна зробити висновок про те, що концентрація абразивних часток в промивній рідині порівняно рідко досягає 4,0 мас. % і вище та знаходиться в основному в межах 1,3 ... 3,0 мас. %.

Робота різьбової пари є плоско-паралельним ковзанням, причому при високих навантаженнях і в присутності хімічно агресивного середовища. Дані фактори створюють сприятливі умови для виникнення втомних руйнувань [32, 33, 37].

Авторами [27, 30, 33, 38] встановлено, що вже після 2...4 циклів згвинчування і розгвинчування конусного з'єднання замків на поверхні спостерігалось виникнення слідів зносу, осп і пігтингу, що свідчить про початок процесу зносу і втомного руйнування.

Знос поверхні різьб може відбуватися як по довгій (бічний) стороні профілю різьби так і по вершині в місці її зрізу у вигляді окремої ділянки, тобто аналогічно осповидного зносу згідно класифікації Б: І. Костецького [39]. До цього часу різьба працює вже в середовищі промивної рідини, так як витіснення мастильного матеріалу, з поверхні різьби, відбувається через 1...2 циклу скручування і розкручування. З цього моменту роль мастила виконує промивна рідина, що циркулює через бурильні труби [38].

Таким чином, навіть короткий розгляд умов роботи різьбового з'єднання і основних видів зношування його робочих поверхонь показує, що елементи різьби знаходяться в дуже складних експлуатаційних умовах одночасного

впливу середовища і навантаження.

Протягом багатьох років проблема підвищення довговічності ЗРЗ вирішується різними способами, основні з яких наступні:

- зміцнення робочих поверхонь тертя [32];
- зниження нерівномірності розподілу навантаження по витках різьби (бічній стороні) [32];
- створення замкових різьб з упорними уступами нової конструкції [32];
- збільшення тривалості перебування мастильного матеріалу на контактуючих поверхнях [27, 30, 32, 33, 38, 40].

Спостереження за роботою бурильних; колон і аналіз, промислових даних про вихід замкових з'єднань з ладу показують, що основною причиною, що приводить до втрати ними працездатності, є знос і поломки замкової різьби.

Характерними видами руйнувань в результаті обстеження замкових з'єднань більше 10000 м. бурильних труб, що пробурили роторним способом близько 100000 м. є злами 37%, розмиви 21%, заїдання 1,5%, знос 40%.

Це викликано нерівномірністю дії контактних тисків при більшій конусності, що призводять до зносу однієї їх бічних поверхонь вершин витка, яка сприймає навантаження від маси бурильних труб. Цей же негативний вплив змінює величину натягу від кількості скручувань і розкручувань, що призводять до зменшення герметичності стику в різьбі і відхиленню половини кута профілю витків різьби і прогресуючого зносу різьби, що знаходиться в основній площині тобто на відстані 24,5 мм від упорного торця ніпеля (муфти).

З наведених даних випливає, що знос замкової різьби перевищує всі види руйнування з'єднання.

У зв'язку з відповідальною роллю замків в роботі БК і масовим їх застосуванням істотне значення набуває дослідження щодо збільшення зносостійкості та працездатності різьб і пошуку раціональних шляхів її підвищення.

Значення підвищення зносостійкості замкової різьби зростає ще в зв'язку з широким застосуванням останнім часом бурильних труб з привареними замками. Природно, що в цих випадках працездатність замків повинна бути не нижче працездатності зварюваних з ними труб.

Існує ряд способів підвищення довговічності різьбових з'єднань: вдосконалення конструкції, застосування нових матеріалів, зміцнення елементів різьби, покращення технології її виготовлення, а так само за допомогою введення в мастильні матеріали спеціальних добавок, що поліпшують їх мастильні здібності і протизносні властивості.

Значні успіхи у підвищенні зносостійкості деталей машин безпосередньо пов'язані з використанням останніх досягнень фундаментальних і прикладних досліджень в галузі тертя і зношування. Перші дослідження, присвячені реалізації ефекту плакування у вузлах тертя бурового обладнання, під керівництвом А. А. Петросянц. Зараз ефект виборчого переносу реалізований в рідких мастилах на мінеральній основі, тобто в мастилах, що не застосовуються для різьбових з'єднань. Це дозволило значно підвищити працездатність при збільшенні зносостійкості металевих пар тертя бурового обладнання за рахунок поліпшення протизносних властивостей мастил.

У роботах ряду авторів простежуються судження, що якість застосовуваного бурового розчину не робить істотного впливу на ресурс замкової різьби. Так буровий розчин, складений на основі бентонітової глини, а також обважений (баритом) глинистий розчин не знижує ресурсу, а підвищений вміст часток (піску) в розчині або в використовуваному мастилі до 7% зменшує напрацювання різьби не більше ніж на 30% [41].

Однак найбільше поширення в практиці буріння газових і нафтових свердловин отримали глинисті промивні рідини, які в більшості своїй є лужними. Тим часом досі залишається актуальним реалізація ефекту виборчого перенесення в рН середовищі. Так само вимагає додаткового вивчення вплив фізико-хімічного складу глинистого розчину, на

зносо- та корозійної стійкості тіл ковзання, в практично вживаному діапазоні лужності.

Таким чином, при бурінні і освоєнні нафтових і газових свердловин важливими елементами, які значною мірою визначають працездатність бурильних і обсадних труб, є різьбові з'єднання. Експлуатаційні характеристики конічних різьбових з'єднань труб, значною мірою впливають на технічні показники буріння і економічну ефективність будівництва свердловин. Вирішення цих питань неможливе без впровадження сучасних технологічних процесів зміцнення труб та вивчення закономірностей зміни механічних характеристик різьбових з'єднань, які багато в чому залежать від конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів.

Підвищення працездатності елементів бурильної і обсадної колони є рішенням сукупності численних проблем створення умов забезпечення максимального використання їх потенційних можливостей. Одним із напрямків вирішення є використання досягнень у галузі зміцнення поверхневих шарів. У зв'язку з цим представляє великий науковий і практичний інтерес проведення досліджень з виявлення умов для реалізації можливостей щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК сучасними технологічними процесами, що дасть можливість розробити рекомендації щодо їх реалізації.

1.2 Основні технологічні процеси підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони.

Працездатність ЗРЗ БК залежить не тільки від матеріалу (хімічного складу, структури), конструктивної форми й розмірів деталей, але й у більшій мірі від технологічних процесів їх виготовлення та обробки. Фізико-механічний стан поверхневого шару замка БК (структура, твердість, шорсткість, залишкові напруження та ін.) після обробки здійснює значний вплив на характеристики міцності, зносо- та корозійної стійкості.

В останні роки вирішення проблеми підвищення працездатності ЗРЗ БК,

все тісніше пов'язується з розвитком технологій зміцнення поверхневого шару.

Задача вибору конкретного методу формування зміцненого поверхневого шару являє собою складну техніко-економічну задачу. Вирішення проблеми підвищення працездатності ЗРЗ БК, виходячи з необхідності поліпшення властивостей конструктивного матеріалу, може здійснюватися, як за рахунок застосування вже існуючих методів зміцнення, так і за рахунок їхнього удосконалення. Зараз відомо понад 130 методів формування захисних зміцнювальних покриттів, що відрізняються фізичними, механічними, хімічними й багатоопераційними способами утворення [42]. У зв'язку з цим виникає необхідність систематизації й класифікації наявних технологічних процесів за наступною схемою:

- механічні методи (методи, що базуються на пластичній деформації, наприклад, ультразвукове зміцнення, зміцнення енергією вибуху, вигладжування, обкатка роликками та ін.);
- методи фізико-хімічного модифікування матеріалу поверхневого шару (наприклад, лазерна обробка, іонна імплантація, хіміко-термічна обробка, іонне азотування та ін.);
- методи нанесення покриттів (наприклад, детонаційне напилення, осадження з парової фази, гальванічні покриття та ін.);
- плакування у двох та багат шарових комбінаціях метал-метал, що одержуються різними способами;
- комбіновані методи.

Але, незалежно від системи класифікації головним є вибір доцільного методу обробки поверхні за умовами експлуатації ЗРЗ БК. На вибір методу формування дифузійного шару впливають наступні фактори [43]:

- час дифузійного насичення;
- структура поверхні, що залежить від складу та тиску реакційного газу;
- обмеження, що вносяться підложкою (наприклад, величина

температурного циклу);

- затрачувана потужність;
- необхідне обладнання та спеціальні засоби технічного забезпечення;
- вартість;
- екологічні аспекти.

При виборі та реалізації технологічного процесу на етапах проектування та виготовлення замків БК необхідно враховувати безліч різнопрофільних факторів: деталь повинна бути технологічною, а значить, треба враховувати швидкість технологічного освоєння та економічні аспекти; експлуатаційні умови – вплив навантаження (робочих напружень), корозійного середовища, ресурс, ремонтпридатність; забезпечення надійності технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару на всіх його етапах (від стадії проектування до стабільного функціонування технологічного обладнання); управління властивостями поверхневого шару за критеріями міцності [44, 45]. Усе це необхідно забезпечити при мінімальних трудо- та енерговитратах і матеріальних ресурсах.

Розглянемо більш детально методи та властивості зміцнених поверхневих шарів, а також вплив технологічних процесів їх формування на механічні властивості сталевих конструктивних матеріалів БК.

Для зміцнення деталей БК широко використовуються гальванічні покриття – хромування, міднення, нікелювання тощо. Електролітичне хромування займає одне з перших місць. Оптимальна товщина гальванічного хрому – 150...250 мкм [46]. Зносостійкість хромового покриття значно підвищує карбідизація [47].

Але електролітичне хромове покриття неможна розглядати як універсальний засіб боротьби зі зношуванням: в залежності від виду зношування в конкретних умовах тертя це покриття може давати великий ефект, не впливати на величину зносу, або навіть збільшувати інтенсивність зношування [47] – при терті хромового шару по бронзі при несприятливих

сполученнях питомих навантажень та швидкостей відносного переміщення інтенсивність зношування електролітичного хрому майже у 8 разів перевищує інтенсивність зношування цементованих та азотованих сталей; нікель – фосфорне покриття у порівнянні з хромовим має у 2...3 рази меншу зносостійкість [48]. Гальванічні покриття мають й інші суттєві недоліки: зниження на 20...30% границі витривалості [49] та на 1...2 класи чистоти поверхні [46]; зниження пластичності та довготривалої міцності основного матеріалу через ефект наводнювання; тріщини на деталях з високоміцних сталей; можливість відшаровування при фінішній обробці та у процесі експлуатації; велика залежність зносу покриттів від навантаження (нікелеві покриття в умовах зношування при швидкостях ковзання, більших ніж 0,042 м/с відшаровуються вже при навантаженні $P = 0,5$ МПа) [49]; великий відсоток браку у виробництві [51]; велика витрата води та електроенергії, забрудненість, токсичність та необхідність очистки відпрацьованих рідин.

Активно розвивається новий напрям створення захисних структур — композиційні електролітичні покриття (КЕП) [52, 53]. Їх одержують із суспензій, які являють собою електроліти з додаванням визначеної кількості високодисперсного порошку.

При газотермічному напиленні (плазмовому, детонаційному та газоплазмовому) потік тонкодисперсних часток, нагрітих до рідкого або пластичного стану, переноситься на поверхню деталі [54...56]. Для відновлення сталевих деталей застосовують газодинамічне напилення [57] сплавів ВК8 та ВК15, порошоків на основі ніхрому та нержавіючої аустенітної сталі, додатково легованих бором та алюмінієм. Детонаційні покриття з ВК15 в 26...30 разів перевищують по зносостійкості загартовану та боровану сталь ХВГ [58]. Цими методами можна отримувати багат шарові покриття від 1 мм і більше, домагаючись хорошої адгезії з основним металом і високої когезії покриття навіть у випадку гетерогенності покриття [59].

Недоліки плазмових покриттів: невелика продуктивність процесу; недостатня щільність (пористість 6...12%) та міцність з'єднання покриттів з

основою; при нанесенні на повітрі ручним способом шум (який перевищує 120 дБ), пил з дрібних частинок матеріалу, який напилюється, ультрафіолетове випромінювання від плазмового потоку негативно впливають на оператора, викликаючи втому, що призводить до нестабільності властивостей покриття; необхідність попередньої підготовки деталі та її шліфування після нанесення покриття через велику шорсткість.

Для зміцнення деталей колінчастих валів, зубчастих коліс широко застосовується лазерна обробка [60]. При початковій твердості 250 HV для сталей з 0,063...0,1% вуглецю в результаті загартування твердість підвищується до 1500...1700 HV. Зміцнений шар сягає глибини 3 мм. Для відновлення опорних поверхонь деталей зі сталей 30ХГСА застосовують лазерне наплавлення [61]. Стрімко розвивається лазерне легування. Для підвищення зносостійкості гальванічних покриттів застосовують лазерне оплавлення поверхні. Розмір шару оплавлення складає 0,15...1,25 мм. Для запобігання окисненню поверхонь сталей, зміцнених лазером, їх зневоднювання та зниження внаслідок цього твердості, необхідно застосовувати захист, наприклад, піддувати аргон [62].

Широке застосування лазерної обробки стримується її недоліками: недостатньою вивченістю механізмів структуроутворення та неможливістю ефективно управляти процесами формування зносостійких структур [63]; малою глибиною зміцнення при малих швидкостях променю за рахунок екрануючої дії плазми; нерівномірністю якостей зміцненого шару при обробці великогабаритних деталей [64]; тріщинами, що виникають під час обробки лазером та призводять до руйнування поверхневого шару; великою вартістю обладнання; необхідністю високої технічної культури обслуговуючого персоналу; багаточисельними структурними дефектами, що виникають через швидке охолодження при лазерній обробці і не виводяться повністю навіть тривалою термічною обробкою; необхідністю попередньої підготовки поверхні для збільшення коефіцієнту поглинання.

Стрімко розвиваються методи хімічного осадження покриттів з

парогазової фази, які у світовій практиці отримали назву CVD (chemical vapor deposition), та методи фізичного осадження покриттів - PVD (physical vapor deposition). Вони мають свої переваги та недоліки. Так, перевагами CVD – методів є однорідність товщини покриття та незалежність її від форми деталі, легкість регулювання складу покриття. Основний недолік цих методів – процес проходить при високих температурах (800...1000 °C), що викликає деформацію та залишкові напруження та призводить до появи тріщин [65]. До того ж, товщина CVD-покриттів зазвичай не перевищує 15 мкм [46]. Переваги PVD – методів – висока швидкість осадження (близько 1 мкм/хв) [65] та утворення щільних та твердих покриттів. Особливо це стосується іонної імплантації. Оптимальна за зносостійкістю товщина PVD – покриттів становить близько 7 мкм, адже за більших товщин вони руйнуються через високі внутрішні напруження [46]. Недоліки PVD – методів – неможливість нанесення покриттів на вироби складної форми, висока вартість процесу.

Перспективними напрямками зміцнення поверхневих шарів є нанесення наноструктурних покриттів [66, 67] та розвиток зміцнюючих технологій, заснованих на формуванні метастабільних станів матеріалу. Однак дослідження у цих напрямках знаходяться лише на початковій стадії, отже достатнього розвитку ці технології ще не набули.

Широко застосується поверхнєве зміцнення деталей ППД, при якому дислокації у металі концентруються навколо ліній зсувів. Дислокації оточені полями пружних напружень, отже для наступних пластичних деформацій (тобто переміщення дислокацій) необхідно значно більше напруження, ніж у незміцненому шарі.

Загальні недоліками дробоструминної обробки та віброгалтування: наявність жорсткого удару дробинки по деталі при значних швидкостях вильоту викликає високі локальні температури (більше 600...650°C); криві залишкових напружень стиску мають значний підшаровий максимум; зародження тріщин від втоми після дробоструминної обробки при всіх температурах проходить рано за рахунок різкого збільшення шорсткості

поверхні, що знижує циклічну міцність; при ударах дробинками спостерігається “залізнення” поверхні — активне перенесення частинок дробу на поверхню деталі, що знижує корозійну стійкість деталей, особливо з матеріалу не на основі заліза.

При ЕІЛ металів та сплавів в результаті розряду між електродом (анод) та виробом (катод) матеріал електроду переноситься на поверхню виробу [64, 65, 68, 69]. Найбільш якісні покриття (шорсткість поверхні не менше 20...40 R_z , суцільність покриття 60...80%, товщина – 30...200 мкм) отримують при ЕІЛ сталевих матеріалів металами 4...6 груп [64]. Кількість отриманих шарів залежить від режимів обробки та міжелектродного середовища. При формуванні шару збільшення часу обробки, зазвичай, призводить не до зростання товщини, а навпаки, починаючи з певного моменту, — до її зменшення [68].

При ЕІЛ через термічний вплив розряду значно зростають зерна у поверхневому шарі основного металу, що призводить до зменшення його міцності. Нагрівання тонких приповерхневих шарів основного металу, близьких до зносостійкої оболонки, супроводжується одночасним і інтенсивним відведенням тепла за рахунок маси холодного виробу. У поверхневих шарах утворюються мікротріщини, що погіршує з'єднання шару, який наноситься, з основним металом. Іншими недоліками ЕІЛ є неможливість отримання 100% суцільності покриття, велика шорсткість поверхневого шару, наявність значних залишкових напружень та зниження на 40...50% втомної міцності деталей, низька продуктивність процесу.

Найпоширенішим способом підвищення властивостей деталей за рахунок збільшення твердості поверхні є ХТО, яка об'єднує операції хімічного та термічного впливу з метою цілеспрямованої зміни складу, структури та властивостей цього шару. Здійснюють ХТО дифузійним шляхом, насичуючи поверхню деталі відповідним елементом (C, N, Al, Cr, Si) в атомарному стані з оточуючого середовища.

Дифузійна металізація – процес дифузійного насичення поверхневих

шарів легуючими елементами, які за рахунок утворення карбідів підвищують зносостійкість покриттів [70, 71]. Застосовують алітування, борування, термодифузійне хромування, силіціювання, а також комбіноване насичення двома металами – хромоалітування, бороалітування тощо [72]. Оптимальна товщина покриття для хромоалітування – 17...20 мкм; хромування – 20 ...25 мкм; ванадіювання – 20 мкм [73].

Боруванням зміцнюють вуглецеві сталі [74]. Електролізне борування дозволяє керувати складом та пластичністю боридної зони [75]. Оптимальна товщина борованого шару – 90...180 мкм. Мікротвердість поверхневих шарів складає 1400...2200 HV. Борування підвищує зносостійкість сталі 45 у 8 разів [75]. Недоліками традиційних видів борування (твердофазового, газового, в сольових розплавах, електролізного) є велика тривалість процесу, відсутність стійких результатів і підвищена крихкість. Газове борування є токсичним і вибухонебезпечним. Недоліки порошкового борування – низька теплопровідність та гігроскопічність насичуючих сумішей, їх висока вартість і необхідність регенерації у разі неодноразового використання, недостатня стійкість контейнерів [76].

Цементация – поверхнєве насичення сталі вуглецем у твердих, рідких та газоподібних насичуючих сумішах (карбюраторах). Також застосовують вакуумну цементацию в ацетилені [77]. Найбільш ефективна цементация для низьковуглецевих та легованих сталей, які вміщують карбїдоутворюючі елементи (Cr, Ti, W). Товщина цементованого шару — 0,9...1,1 мм [46]. Зносостійкість після цементации є однаковою із зносостійкістю після загартування і низькотемпературного відпуску, у 15 разів нижчою, ніж після нанесення покриття вакуумним осадженням, і в 1,5 рази нижчою, ніж після нітроцементации [46]. При високотемпературній цементации зростання зерна у поверхневому шарі призводить до зниження механічних властивостей. Після цього способу ХТО спостерігається найнижчий приріст ерозійно-корозійної та гідроабразивної стійкості. Наводнювання та внутрішнє окиснення легуючих елементів, які виникають в деталях при цементации, різко знижують їх

експлуатаційні властивості.

Ще один метод ХТО – азотування – є ефективним засобом підвищення зносостійкості та втомної міцності, антикорозійне азотування – циклічної міцності деталей. Твердість азотованих нелегованих сталей – 500...900 HV, легуваних – 1000...1300 HV. Товщина азотованого шару – 50...750 мкм [46]. Основним недоліком газового азотування є утворення на поверхні сталі білого шару нітридів, який не травиться і має підвищену тенденцію до відшаровування. Наявність у складі насичуючої суміші при газовому азотуванні великої кількості водню викликає водневе окрихчування поверхневої нітридної зони, тому її необхідно зішліфувати. Цей недолік дещо усувається при “м’якому” азотуванні у сольових розплавах. Газове азотування знижує короблення деталей у порівнянні з цементацією, але призводить до більших деформацій, ніж карбонітрація. Ще одним недоліком газового азотування є його велика тривалість – до 100 годин, що призводить до великих енерговитрат. При традиційному азотуванні вже за незначного витримування на поверхні досягається велика мікротвердість, проте загальна товщина азотованого шару є малою, а градієнт твердості дуже великий. Це може призвести до зколювання гострих кромки, а після зносу більше 0,07 мм твердість є настільки малою, що зношування починається з обвальною кінетикою. Збільшення часу витримування призводить до збільшення товщини азотованого шару, проте при цьому у поверхневій зоні через її пересичення азотом відбувається перерозподіл азоту у вільну форму з утворенням мікропор та, як наслідок, зниження мікротвердості.

Перспективним для поверхневого зміцнення деталей вважається метод ВПА [78...82]. Його сутність полягає у тому, що у розрідженому газовому середовищі, яке містить азот, між катодом (деталлю) та анодом (стінками вакуумної камери) збуджується тліючий розряд. При цьому позитивні іони газу з високою енергією, бомбардуючи поверхню катоду, нагрівають її до температури насичення та дифундують в цю поверхню, формуючи твердий розчин азоту в металі, а при досягненні межі розчинності – нітридні фази.

Температура азотування – 470...580⁰С, тиск – (1,33...13)10² Па, робоча напруга – 400 до 1000 В [83].

Метод ВПА має цілий ряд переваг:

- підвищення границі витривалості, втомної міцності та зносостійкості оброблених деталей до 5 разів [84] (зносостійкість іонноазотованих шарів сталі 20Х13 в різних середовищах у збільшується у 1,7...4 рази [85]);

- більш низька, ніж в інших методах температура обробки, завдяки чому у матеріалах не відбувається структурних перетворень, відсутня їх деформація після обробки, високий клас чистоти поверхні, що виключає додаткові доводочні операції [86];

- можливість регулювання процесу азотування для оптимізації дифузійних шарів по будові, фазовому складу та властивостях;

- збереження твердості азотованого шару після нагрівання до 600...650⁰С;

- можливість обробки виробів необмежених розмірів та форм;

- відсутність токсичності та забруднення навколишнього середовища;

- скорочення тривалості обробки у 2...5, витрат робочих газів – у 20...100 разів, електроенергії – у 1,5...4 рази, додаткових матеріалів – на 50 % порівняно з іншими методами [87]. За більш короткий час за допомогою ВПА можна досягнути значень твердості у 1,3 – 1,5 разів більших, ніж при газовому.

Метод ВПА може застосовуватися на різних стадіях життєвого циклу замків БК – як при їх виробництві, так і при відновленні. Застосування його на ранніх стадіях дозволить уникнути використання у наступному більш дорогих та екологічно небезпечних методів.

Показано, що у процесі ВПА можна отримати модифіковану поверхневу структуру при температурі до 600⁰С, що не призводить до зниження механічних властивостей основного матеріалу [88].

Досліджуються закономірності насичення азотом у тліючому розряді

покриттів, попередньо нанесених із рідиннометалевого носія на сталеву поверхню. Це надає можливість заліковування дефектів типу пор та мікротріщин у поверхневому шарі основного металу [89]. Розробляється комбінована технологія зміцнення поверхонь конструкційних сталей лазерним легуванням нітридоутворюючими елементами з наступним азотуванням [90]. ВПА успішно застосовують для зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів [91...93] сталей із керамічними покриттями [94].

Отже, з аналізу основних методів створення захисних структур можна зробити висновок, що найбільш перспективним зараз для зміцнення ЗРЗ БК є метод ВПА. Однак широкому його впровадженню у практику підприємств заважають наступні причини: відсутність системних досліджень процесу формування дифузійних іонноазотованих шарів для широкого класу конструкційних матеріалів; відсутність нормативної документації та методик вибору раціональних технологічних режимів поверхневого зміцнення методом ВПА; недостатня кількість якісного обладнання для реалізації методу.

1.3. Підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням.

В результаті аналізу вакуумних іонно-плазмових технологічних процесів створення дифузійних іонноазотованих поверхневих шарів виявлено, що [95...97] атоми металу при ізотермічному іонному азотуванні сполучаються з азотом, утворюючи при цьому нітриди, наслідком розпаду яких стає утворення твердого розчину. При цьому, атомарні іони азоту відіграють значну роль у процесі ізотермічного іонного азотування та експериментально виявлені у прикатодних шарах газового середовища [97] де надлишкова концентрація азоту у твердому розчині сприяє хімічним перетворенням.

В роботі [99] на основі аналізу встановлено, що нітриди, які існують у вигляді трьох типів, відмінні за формою взаємодії з кристалічною решіткою,

розміром та типом структури.

Відмінні за типом структури [98, 99] – зародки нітридів, у яких атоми займають ті ж місця, які вони займали у вихідному твердому розчині, тобто атоми азоту займають октаедричні пори ОЦК-матриці, а атоми легуючого елементу азоту заміщують деякі атоми заліза. У початковому кластері розчинені атоми заміщення та упродовження розташовуються випадковим чином, а сам кластер перед азотуванням повинен бути повністю когерентним з матрицею [98, 99]. Перерозподіл легуючих елементів у цьому випадку супроводжується спотворенням решітки матриці навколо пластинчастих зон, а не перебудовою старої структури [98, 99]. Це пояснює появу на мікроелектронограмах безперервних дифузійних тяжів вздовж напрямків $\langle 100 \rangle$ решітки матриці [98, 99].

Відмінні за розміром [98, 99] – багат шарові комплекси нітридної фази товщиною 2...5 нм, які мають кристалічну решітку з періодом $a = 0,412$ нм типу NaCl. Через велику різницю між площинних відстаней у ОЦК-матриці та нітридній фазі утворення такого багат шарового зародку призводить до порушення когерентності по краях пластин. При цьому когерентність матриці та нітриду по площині $\langle 100 \rangle$ ще зберігається [99].

Відмінні за формою взаємодії кристалічної решіткою [98, 99] – частки нітридів розмірами 7...10 нм з порушеною когерентністю решіток нітриду та матриці. Нітриди утворюють скупчення у вигляді тонких пластинчастих виділень, розташованих під невеликим кутом один до одного.

Крім цього, хімічний склад сталі, дефекти кристалічної будови матриці, режими попередньої термічної обробки та азотування здійснюють вплив на щільність та розмір розподілу нітридної фази [97, 98, 99]. У азотованому шарі низьколегованих теплостійких сталей мартенситного класу частки, що утворюються на дефектах, як правило, є некогерентними до решітки матриці та сприяють закріпленню та збереженню великої щільності дислокацій у матриці [95...97].

Встановлено, що природа легуючого елементу та його кількість суттєво

впливає на розмір нітридних часток. Так, у сплаві Fe - 4% (ат.) Cr – некогерентні рівновісні частки розміром 4...6 нм., а у сплаві Fe - 1% (ат.) Cr, проазотованому при 540⁰C протягом 35 год., утворюються зародки нітриду хрому [97, 98, 99].

Таким чином, на основі аналізу наукових джерел щодо формування зміцненого шару методом ВПА виявлено, що постійно відбувається пошук шляхів підвищення ефективності технологічного процесу.

Так, в роботах [100...104] пропонують, щоб не допустити перехід тліючого розряду у дуговий, процес дифузійного насичення азотом здійснювати у плазмі пульсуючого струму. Це приведе до збільшення швидкості процесу завдяки малій тривалості імпульсів великої напруги та струму.

В роботі [105] запропоновано здійснювати процес в умовах насичення робочим газом вакуумної камери при циклічному нагріванні та охолодженні деталей, тобто використовувати комбінований термоциклічний режим.

У роботі [106] авторами здійснено теоретичний опис кінетики процесу за оцінкою енергетичних характеристик (енергії активації та активаційного об'єму) процесу в умовах дифузійного насичення сталей в режимі ХТО. Автори у роботі [107] розкривають можливість підвищення міцності конструкційного матеріалу при задовільній пластичності завдяки застосування термічних циклів при азотуванні.

В роботах [108, 109] авторами зазначено, що для підвищення ефективності технологічного процесу, а саме скорочення часу створення дифузійних азотованих шарів конструкційних сталей процес насичення необхідно здійснювати в умовах імпульсної подачі аміаку (так зване газоциклічне азотування).

В роботі [110] показано, що ефективність технологічного процесу ВПА підвищується в умовах низького вакууму та дугового розряду.

В роботі [111] автором встановлено, що регулювання процесу азотування можна здійснювати у газотермоциклічних умовах. При цьому

технологія обробки полягає у періодичному чередуванні як циклів насичення робочим газом так і при умовах термоциклічного режиму для розподілу азотованого шару в основу матеріалу.

Також, у роботі [112] запропоновано формування зміцнених поверхневих нітридних шарів здійснювати з використанням комбінованого азотування, а саме чередування газового азотування та азотування у тліючому розряді.

Таким чином, на основі аналізу літературних джерел встановлено, що підходи щодо застосування методу ВПА використовують лише окремі можливості підвищення його ефективності та основними шляхами підвищення ефективності технологічного процесу ВПА є здійснення його в газотермоциклічному режимі в умовах імпульсного струму для підвищення швидкості азотування та уникнення оплавлення ЗРЗ БК.

Висновки до розділу 1 та постановка задач дослідження

1. Проведений аналіз сучасних поглядів на підвищення працездатності БК показав, що працездатність її конструкційних елементів при рівних інших умовах визначається механічними властивостями матеріалів, які використовуються для їх виготовлення, фізико-хімічними реакціями, які виникають на поверхнях їх контакту, та умовами експлуатації.

2. Встановлено, що основними видами руйнування конструкційних елементів БК є руйнування від втоми, корозійного пошкодження та зношування робочих поверхонь.

3. Аналіз статистичних даних свідчить, що з усіх відбракованих деталей БК найбільша кількість (45%) складають ЗРЗ БК зі сталі 40 ХН.

4. На підставі 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.

5. Широкому впровадженню технологічного процесу вакуумного іонно-плазмового азотування заважають відсутність оптимальних параметрів поверхневого зміцнення методом ВПА; відсутність сучасного якісного обладнання в Україні 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.

Виходячи з вищесказаного, *метою роботи* є підвищення працездатності елементів бурильної колони удосконаленим методом імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування та встановлення закономірностей впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу 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 границя витривалості, корозійної стійкості та зносостійкості.

4. Розробити технологічні рекомендації щодо підвищення працездатності елементів БК удосконаленим методом ІВГТЦПА.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Для всебічної комплексної оцінки механічних властивостей поверхневих шарів на базі системного підходу, задача оптимізації технологічного процесу поверхневого зміцнення ЗРЗ БК за допомогою ІВГТЦ ПА розглядалася як багатофакторна (з урахуванням конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів) та багатокритеріальна (з оптимізацією за трьома критеріями оптимізації).

Застосування багатофакторного планування експерименту та математичної обробки статистичних даних дає можливість представити технологічний процес у вигляді функціональної залежності вхідних та вихідних параметрів, визначити оптимальні технологічні режими, за допомогою яких можна одержати поверхневі шари із заданими властивостями та забезпечити значення механічних властивостей якомога ближче до оптимальних. При цьому стає можливим розглядання технології поверхневого зміцнення як способу управління властивостями поверхневого шару.

В розділі обґрунтовано загальний підхід до виконання роботи, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення наукового завдання, яка припускає аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально-морфологічний аналіз і розробку системи показників якості, а також процес моделювання технологічного процесу з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них. Розкрито сутність використаних методик експериментальних досліджень механічних властивостей зміцнених поверхневих шарів.

2.1. Основні принципи системного підходу до вирішення проблеми підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони.

Основоположним принципом та передумовою розробки рекомендацій щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦ ІПА є системність та комплексний характер дослідження механічних властивостей, що дозволяє логічно упорядкувати складні процеси дослідження на спільній методологічній інформаційній базі системного підходу, в основі якого лежать відомі принципи фізичності, моделювання і цілеспрямованості, що визначає основні операції й процедури системного дослідження (декомпозицію, змістовний аналіз, формалізований опис, моделювання, дослідження і вибір оптимального варіанту). Виходячи із системного підходу, організація дослідження становить собою ієрархічну структуру таких методологічних рівнів:

- проблемний аналіз, що припускає з'ясування суттєвості проблемної ситуації та актуальності наукового завдання, визначення мети дослідження і загальну постановку задач;

- концептуальний рівень дослідження, що вміщує аналіз системного оточення, виділення з нього технологічного процесу й обґрунтування засобів його вибору, що створюють структурно-операціональний базис концепцій проведення операції вибору;

- операціональний рівень дослідження, що припускає проведення функціонально-морфологічного аналізу, визначення значень механічних властивостей та вибір за концепцією придатності кращих режимів для створення структурно-функціонального базису системного дослідження технологічного процесу на детальному рівні й розробку його математичних моделей;

- детальний рівень дослідження, що вміщує формування структурно-елементарного базису операції вибору оптимальних проектних варіантів, обґрунтування й оцінку пропозицій щодо удосконалення технологічного

процесу;

- завершальний етап прийняття рішення щодо вибору оптимальних параметрів технологічного процесу, які дозволять вирішити наукове завдання.

Через недостатню кількість відомостей щодо механізму формування іонноазотованих зміцнених поверхневих шарів, при побудові математичної моделі обмежувалися схематичним представленням об'єкту дослідження у вигляді “чорного ящика” [113, 114], на який впливають такі групи факторів [115, 116]: $X=(X_1, X_2, X_3...X_k)$ – фактори, що контролюються та можуть цілеспрямовано змінюватися в ході дослідження; $U=(U_1, U_2, U_3...U_m)$ – фактори, що контролюються, але не можуть цілеспрямовано змінюватися в ході експериментальних досліджень; $Y=(Y_1, Y_2, Y_3...Y_p)$ – вихідні змінні (критерії оптимізації); $Z=(Z_1, Z_2, Z_3...Z_n)$ – фактори, що не контролюються і не управляються.

Задача дослідження полягала в обиранні значень $X_i = var$, при яких критерій оптимізації об'єкту Y досягав би оптимальної величини при фіксованих параметрах $U_j = const$ і $Z_r = const$, тобто в оптимізації функції $Y = f_{opt}(X_i = var; V_j = const; Z_k = const)$, при $X_{iH} \leq X_i \leq X_{iB}$ [117, 118].

Статистичною математичною моделлю об'єкту є функція відгуку $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k)$, представлення якої обмежували поліномом [119]:

$$Y^* = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i<j<l}^k b_{ijl} x_i x_j x_l, \quad (2.1)$$

де Y^* – розрахункове значення параметру оптимізації;

$b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}, b_{jj}$ – вибіркові коефіцієнти, отримані методами регресійного аналізу за результатами експерименту.

Математичне моделювання проводилося за такими етапами [117, 120, 121]: формалізація задачі, побудова плану експерименту, проведення експерименту та попередній статистичний аналіз його результатів, побудова

математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості моделей, проведення розрахункового експерименту з використанням побудованих моделей, формування висновків та рекомендацій.

Спочатку було обрано залежні (критерії оптимізації) та незалежні (фактори) змінні, визначено склад контрольованих некерованих і керованих змінних, рівнів варіювання для керованих і рівнів фіксації для некерованих змінних [122, 123, 124]. Кількість незалежних змінних дорівнювала 6, отже, згідно з рекомендаціями [125, 126], необхідна кількість дослідів становила 16 варіантів.

План експерименту було згенеровано на основі ЛП_τ-чисел (математичний апарат яких розробив І. М. Соболев [125, 126]), тому що такі плани мають ряд переваг [121]: при “випаданні” одного з експериментів властивості плану погіршуються в межах, що дозволяють його використовувати; ці плани одночасно є планами пошуку оптимальних умов та дозволяють глибше аналізувати досліджувану область; ЛП_τ-плани можна використовуватися послідовно – витрати можуть збільшуватися поступово, поєднуючи попередні результати з наступними. План експерименту будували за допомогою ППП ПРІАМ (пакет прикладних програм “Планування, регресія й аналіз моделей”) [127, 128]. Отриманий план являє собою матрицю, кожний рядок якої містить кодовані значення (десятковий дріб в інтервалі від 0 до 1) незалежних змінних для кожного рівня.

Переведення одержаної матриці з кодованих змінних до натуральних здійснювалося за формулою [127, 128]:

$$X_{ij} = X_{\min j} + Q_{ij} \times (X_{\max j} - X_{\min j}), \quad (2.2)$$

де X_{ij} – натуральне значення j -го фактору в i -му досліді;

Q_{ij} – кодоване значення j -го фактору для i -го досліді;

$X_{\max j}$ ($X_{\min j}$) – максимальне (мінімальне) значення j -го фактору.

У відповідності до згенерованої робочої матриці безпосередньо проводився експеримент та попередній аналіз його результатів: результати

повторних дослідів, проведених у номінально однакових умовах, перевіряли на статистичну відтворюваність за G - критерієм Кохрена :

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (2.3)$$

де S_{\max}^2 – максимальна з дисперсій;

S_i^2 – дисперсії, що розраховані в кожному експерименті за повторним

(дублюючим) дослідом за формулою: $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}$, (n – кількість паралельних (дублюючих) дослідів; Y_{ij} – значення відгуку в i -му експерименті при j -му повторенні; \bar{Y}_i – середнє значення відгуку за повторними дослідями в i -му експерименті).

Отримані результати порівнювали з табличними, і якщо $G_{\text{роз}} < G_{\text{табл.}, \alpha, n-1, N}$, то гіпотеза про однорідність приймалася і дисперсія відтворюваності

розраховувалася за формулою: $S_{\text{відтвор}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(n-1)N}$.

Перед початком побудови моделі за допомогою F -критерію Фішера перевіряли належність до однієї генеральної сукупності дисперсії відносно загального середнього та дисперсії відтворюваності:

$F^{\text{роз}} = \frac{S_{\text{відтвор}}^2}{S^2} < F^{\text{табл.}, \alpha, N(n-1), N-1}$, $S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{N-1}$, де \bar{Y} – загальне середнє (середнє

всіх середніх за стовпцем).

Далі, за результатами експериментальних даних будували лінійну за параметрами регресійну модель (2.1): з початкової безлічі регресорів, що включають всі головні ефекти і всі взаємодії заданих типів, обирали деяку кількість, яка повинна включати пошукову структуру моделі, та за допомогою

процедури покрокового регресійного аналізу визначали кінцеву структуру моделі. Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводили за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u \bar{X}_{iu}}{n}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} X_{ju} \bar{Y}_u}{n}. \quad (2.4...2.6)$$

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії виконували за критерієм Ст'юдента: знаходили дисперсію похибки визначення коефіцієнту b_i $S^2_{b_i} = \frac{1}{N \cdot n} S_{\text{відтвор.}}^2$ (де N – кількість дослідів; n – кількість паралельних (дублюючих) дослідів; $S_{\text{відтвор.}}^2$ – дисперсія відтворюваності; далі визначали відношення абсолютного значення коефіцієнту регресії b_i до середнього квадратичного відхилення похибки його визначення: $t_{\text{роз.}} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}$) та табличне значення критерію $t_{\text{табл.}}$ при заданому числі ступенів свободи $f = N \cdot (n-1)$ та обраному рівні значущості $\alpha = 0,05$. Якщо $t_{\text{роз.}} \geq t_{\text{табл.}}$, то коефіцієнт b_i вважали значущим, при $t_{\text{роз.}} < t_{\text{табл.}}$ коефіцієнт не включали до рівняння регресії.

Для прийняття рішення щодо можливості використання моделі для практичних цілей перевіряли її адекватність, інформативність та стійкість.

Адекватність перевіряли з використанням критерію Фішера [119, 129]: розраховували дисперсію адекватності $S_{\text{ад.}}^2 = \frac{n}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2$ (де \hat{Y}_i – значення функції відгуку, що розраховане для i -го дослідів за моделлю; l – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії), обчислювали значення F -критерію Фішера $F_{\text{роз.}} = \frac{S_{\text{ад.}}^2}{S^2}$ та порівнювали його з табличним $F_{\text{табл.}}$ (при визначених ступенях свободи чисельника $f_1 = N-l$, знаменника $f_2 = N(n-1)$ й рівні значимості $\alpha = 0,05$). Якщо $F_{\text{роз.}} \leq F_{\text{табл.}}$, то з обраною довірчою ймовірністю вважали, що модель адекватно описує процес, що досліджувався.

Інформативність моделі оцінювали за величиною множинного коефіцієнта кореляції R (коефіцієнту кореляції між експериментальними значеннями відгуків й значеннями відгуків, що розраховані за моделлю), величина якого для активного експерименту повинна бути не менше

0,96...0,97) [120]. Величину R^2 обчислювали за формулою:
$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}.$$

Достатньою умовою є перевірка значимості коефіцієнту множинної кореляції за критерієм Фішера: $F_R = \frac{S_R^2}{S_{зал}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{зал}}$, де $V_R, V_{зал}$ – ступені свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю, та залишкової дисперсії відповідно.

За умови виконання даної нерівності, модель із заданим рівнем значимості є інформативною. Для кількісної оцінки рівня інформативності моделі також використовували критерій Бокса-Веца. Хороша модель повинна мати параметр γ (значення γ визначається з наступного рівняння $F_0 \cong (1 + \gamma) F_{\alpha, V_0, V_{зал}}$, де $V_0 = \frac{V_R(1 + \gamma)^2}{1 + 2\gamma^2}$) не нижче, ніж 2...3 [130].

Для перевірки стійкості розглядали таблицю мультиколінеарності [130]. Структура рівняння регресії вважалася стійкою, якщо максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не перевищував за абсолютною величиною 0,3...0,4, а коефіцієнт парної кореляції з відгуком за абсолютною величиною був істотно більшим, ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

Багатокритеріальна оптимізація отриманих за результатами експерименту моделей виконувалася з використанням компромісу за Парето, який полягає в пошуку таких умов функціонування системи, за якими узагальнений критерій Y її оптимальності досягає екстремального значення: $Y \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots, x_k \end{bmatrix} \bar{=} Y \begin{bmatrix} y_1 = \min, y_2 = \max, \dots, y_k = \min \end{bmatrix} \bar{=} opt$ [131].

Визначення рангів та вагових коефіцієнтів критеріїв оптимізації проводилося за допомогою методу експертних оцінок [120, 132]. Висновки

експертів перевірялися на предмет їх узгодженості за допомогою коефіцієнта конкордації Кендала [120, 132]:

$$W = \frac{12}{m^2(m^3 - n)} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \left(R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \quad (2.7)$$

де n – кількість параметрів (об'єктів), що оцінюють експерти;

m – кількість експертів;

R_{ij} – ранг j -го об'єкта (параметра), призначений йому i -м експертом.

Статистичну значущість вибіркового значення коефіцієнту конкордації перевіряли за величиною $\chi^2_{\alpha, n-1}$ (α -процентної точки χ^2 -розподілу зі ступенями вільності $(n - 1)$), яку брали з таблиці [132]. Наближене значення $\chi^2_{\alpha, n-1}$ -роподіленої величини дорівнює $m(n - 1)W$. При виконанні умови $m(n - 1)W > \chi^2_{\alpha, n-1}$ гіпотеза про відсутність рангового множинного зв'язку між оцінками параметрів експертами відкидалася.

При оптимізації використовували метод випадкового пошуку на основі ЛП_τ - рівномірно розподілених випадкових точок [148, 133], тому що даний метод дозволяє знайти глобальний екстремум, а не локальний, як усі інші; із зростанням числа ітерацій метод сходиться, що не гарантовано в інших; ефективність методу не залежить від форми поверхні відгуку; ефективність випадкового пошуку істотно залежить від “рівномірності” розподілу випадкових точок у багатовимірному одиничному кубі (у фактичному просторі), а найкращими для зондування цього простору серед відомих зараз рівномірно розподілених послідовностей є ЛП_τ-послідовності [124, 126].

Оптимальну точку у факторному просторі знаходили за методикою [134]. Узагальнений критерій оптимізації $y_{узг}$ розраховували за формулою:

$$y_{узг} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(1 - D_{jr} - \frac{2}{j} \cdot W_j^2 \right)}, \quad (2.8)$$

де $y_{узаг}$ – значення узагальненої цільової функції для r -го дослідження експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ($y_{узаг} \rightarrow 0$) і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1;

W_j – вага j -го критерію оптимізації;

m – кількість критеріїв оптимізації;

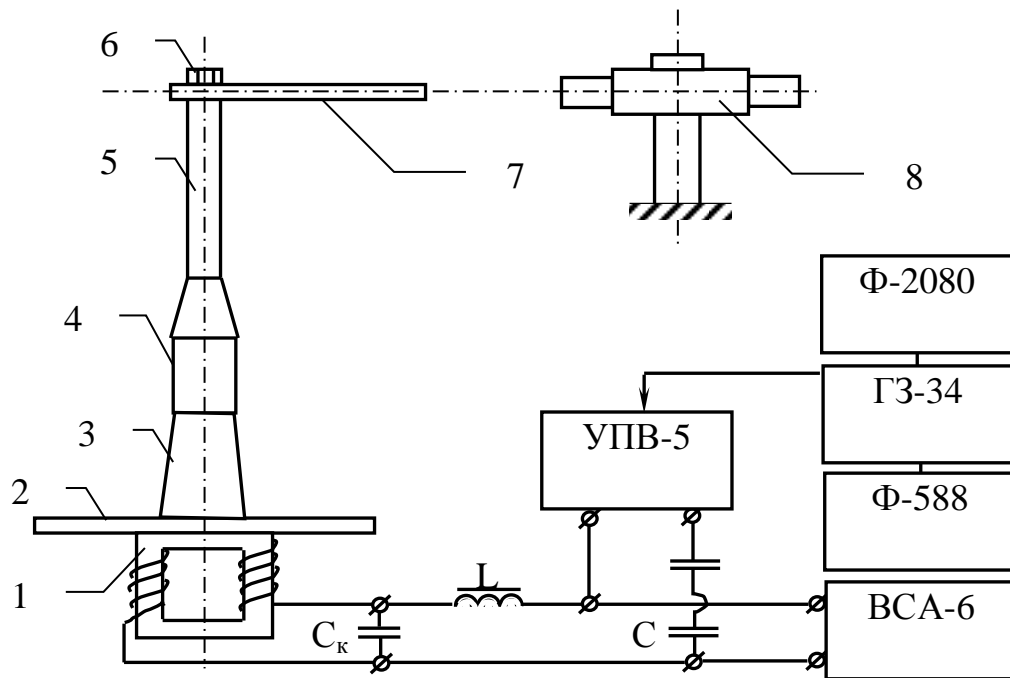
D_{jr} – зведене до інтервалу 0...1 значення j -го критерію оптимізації у r -му дослідженні експерименту; коли метою j -го критерію оптимізації є МІНІМУМ обчислюють за формулою $D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}$, де $y_{j\max}$ і $y_{j\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення j -го критерію оптимізації серед N дослідів (пробних точок) [135].

Точка факторного простору, якій відповідало найменше значення узагальненого критерію оптимізації (якому відповідає максимальне значення $y_{ефект}$ ($y_{ефект} = 1 - y_{узаг}$)), була оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень – рядком з оптимальними значеннями параметрів. Для визначення найкращої точки використовували функцію ППП ПРІАМ “Багатопараметрична оптимізація” [136, 137]. Навколо найкращої отриманої точки проводили перевірочний експеримент (3...4 дослідів) [123].

Застосована методика математичного моделювання дозволила позбавитися основних недоліків класичної теорії планування експерименту та регресійного аналізу – планування та обробки моделей заздалегідь заданої структури та обов’язкового використання стандартної області планування.

2.2. Експериментальний комплекс для випробувань матеріалів за критерієм циклічної міцності – границі витривалості.

2.2.1. Магнітострикційна установка для високочастотних випробувань на втому [138, 148, 208]. Експериментальні дослідження на втому проводилися на магнітострикційній установці, яка розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України [138]. Схему експериментального обладнання наведено на рис. 2.1.



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

Рисунок 2.1 – Схема магнітострикційної установки [138]

Основні умови роботи експериментального обладнання полягають в тому, що робоча частота установки, при якій можливе її використання для випробувань на втому, лежить у межах $\sim 9,8 \dots 10,8$ кГц. Принцип дії вібратора 1 установки заснований на використанні явища магнітострикції, що полягає в здатності деяких матеріалів (нікель, пермендюр та інші) змінювати свої лінійні розміри під дією змінного магнітного поля. Змінне магнітне поле вібратора створюється пропусканням через його обмотку змінного струму, частота якого дорівнює робочій частоті установки; обмотка служить також для збудження в

пакеті постійного магнітного потоку, що підмагнічує. Величина сили струму підмагнічування задавалася близько 15 А при напрузі 2...3 В [138, 208].

Електрична частина установки складається з генератора типу ГЗ-34, лічильника циклів Ф-588, частотоміра Ф-2080, джерела постійного струму – вирівнювача ВСА-6 (див. рис. 2.1.).

На магнітострикційній установці при дослідженнях на втому здійснюється незалежне збудження коливань системи, так, що частота їх визначається настроюванням генератора, що задає відповідну частоту коливань і вимірюється електронним частотоміром. Знижуючи чи підвищуючи амплітуду коливань, при визначеному числі циклів навантаження, установлюється необхідний для руйнування від втоми зразків рівень напруг.

2.2.2. Методика високочастотних випробувань на втому. Аналіз останніх джерел досліджень та публікацій, в яких започатковано розв'язання задачі випробувань на втому, показує, що зараз існують зручні та надійні методики прискорених досліджень на втому матеріалів з частотою навантаження 10 кГц. Дана методика високочастотних випробувань на втому розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Розкриємо коротко особливості даної методики, яка викладена в роботах [138, 140, 141, 208]. Сутність існуючої методики полягає в тому, що при дослідженні циклічної міцності конструктивних зміцнених матеріалів необхідно враховувати ймовірність впливу на результати експерименту конструктивного фактора, який пов'язаний з особливістю зміцненого поверхневого шару, що формується. Враховуючи дифузійне насичення реакційним газом поверхні зразка, розрахунок границі витривалості може базуватися на використанні методу еквівалентних жорсткостей [142] як граничного випадку загального методу, що враховує характер дифузійного насичення [143].

В основі розрахунку використаних у роботі зразків лежить диференціальне рівняння форм власних коливань призматичної балки [143-146]:

$$W^{(4)} - k^4 W = 0, \quad (2.9)$$

де $W = W(x)$ – прогини балки вздовж її довжини l , м; k – частотний параметр (1/м), який розраховується за формулою:

$$k^4 = \frac{\omega^2 \rho F}{EJ}, \quad (2.10)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова власна частота, 1/с; f – лінійна частота, 1/с; $F = bh$ – площа поперечного перетину, м²; b – ширина, м; h – висота, м; E – модуль Юнга, МПа; ρ – щільність, кг/м³; $J = bh^3 / 12$ – момент інерції площі F відносно нейтральної осі перетину, м⁴.

Для балки прямокутного поперечного перетину замість (2.10) можна записати:

$$k^4 = \frac{12\omega^2 \rho}{h^2 E}. \quad (2.11)$$

Для розрахунку максимальних за висотою нормальних напружень використовується відома формула [146]:

$$\sigma = \frac{EhW''}{2}. \quad (2.12)$$

Призматичні зразки є найбільш простими з усіх відомих і тому найбільше технологічні (рис. 2.2). Вони кріпляться на вібраторі установки в “точці”, тобто гвинтом малого діаметра.

При виборі розмірів зразків виходили із заданої частоти випробувань f , яка відповідає робочій частоті магнітострикційної установки, і товщині зразка h , яка відповідає товщині листового матеріалу, що досліджувався. Довжина зразка l попередньо вибирається з припущення, що зразок-балка закріплений

шарнірно одним кінцем, а інший кінець – вільний, та визначається за формулою [147]:

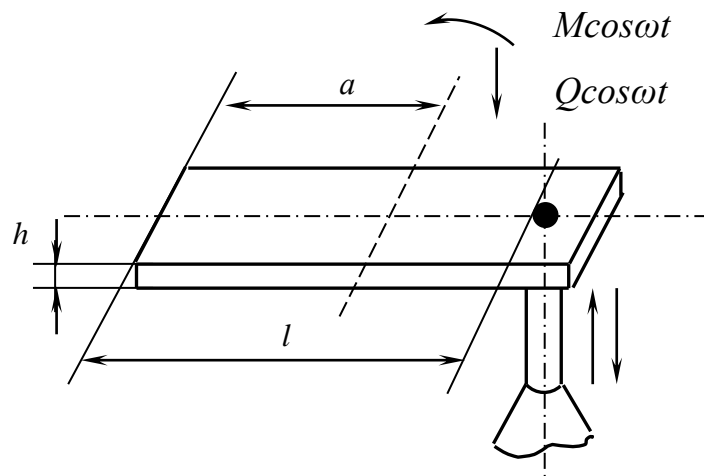


Рисунок 2.2 – Схема закріплення призматичного зразка [148]

$$L^2 = \lambda^2 \frac{h}{2\pi f} \left(\frac{E}{12\rho} \right)^{\frac{1}{2}},$$

де λ – безрозмірний параметр частоти.

У процесі підготовки досліджень ця довжина експериментально коректується так, щоб руйнування зразка від втоми відбувалося на віддаленні від зони закріплення. Ширину зразка вибрано зі співвідношення $b=1,5...15h$. Напруги в місці руйнування від втоми визначаються за формулою (2.12) [144], у якій необхідно внести відповідне значення другої похідної від функції W . Щоб установити характер цієї функції для даного зразка, необхідно вирішити рівняння (2.9) [144] і, як зазвичай, задовольнити граничним умовам.

Для балки із закріпленням у “точці” виникають труднощі при спробі встановлення граничних умов у місці закріплення і тому тут проблема у визначенні W вирішується непрямым шляхом. Враховується, зокрема, що при експерименті використовуються форми коливань із вузловими перетинами, що паралельні торцю зразка.

У цьому випадку вважаємо, що уздовж перетинів, які паралельні вузловим, прогини $W \cos \omega t$, поперечні сили $Q \cos \omega t$ і моменти $M \cos \omega t$, що згинають, будуть розподілені рівномірно, тобто як у класичній балці. Виходячи з цього, приймаємо схему розрахунку за методом перетинів. Розглядаємо коливання робочої (лівої) ділянки балки довжиною, a без опори під дією деяких сил $Q \cos \omega t$ і моментів $M \cos \omega t$ (рис. 2.3).

Прийнявши початок координат на вільному кінці цієї ділянки, рішення рівняння (2.9) записуємо у вигляді, що тотожно задовольняє умовам $W'' = W''' = 0$ при $x=0$, тобто:

$$W = A \left[S(kx) + \frac{B}{A} T(kx) \right], \quad (2.13)$$

де S і T – функції Крилова [145].

Враховуючи, що $S''(kx) = k^2 U(kx)$ та $T''(kx) = k^2 V(kx)$ то вираз (2.13) прийме вигляд [146]:

$$W'' = k^2 A \left[U(kx) + \frac{B}{A} V(kx) \right],$$

де $U(x) = \frac{1}{2} \langle h k x - \cos kx \rangle$ та $V(x) = \frac{1}{2} \langle h k x - \sin kx \rangle$. Або для розрахунку більш

зручно використовувати наступні системи часткових рішень рівнянь:

$$S(x) = \frac{1}{2} \langle h k x + \cos kx \rangle,$$

$$T(x) = \frac{1}{2} \langle h k x + \sin kx \rangle.$$

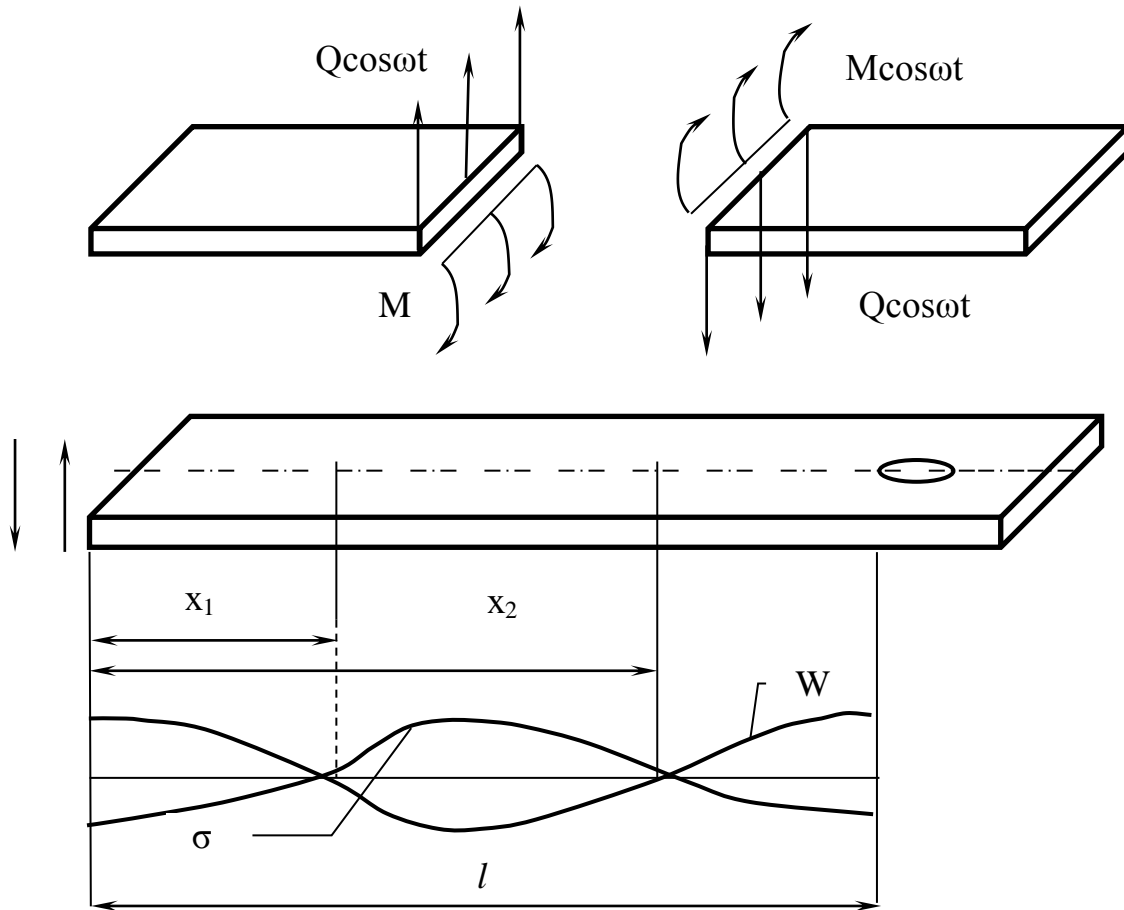


Рисунок 2.3 – Характер навантаження призматичного зразка та розподіл у ньому прогинів W й напружень σ при коливаннях за третьою формою коливань [148]

Якби моменти $M \cos \omega t$ і сили $Q \cos \omega t$ були відомі (яким-небудь чином визначені), то задовольнивши умові $EJW''(a) = M$; $EJW'''(a) = Q$, можна було б вирішити питання про напруження (2.13), визначивши параметри A , B , k . Через відсутність такої можливості використовуються результати експерименту. Так, якщо амплітуда коливань на вільному краї $x=0$, що вимірюється звичайно, мікроскопом, має величину W_0 , то згідно (2.13) одержимо:

$$A = W_0, \quad (2.14)$$

Частотний параметр k обчислюється за формулою (2.11), якщо відома резонансна частота f , що вимірюється електронним частотоміром. Останнє невідоме – постійну B можна виразити через амплітуду $W(b)$ якого-небудь перетину $x=b$. В результаті з (2.13) із врахуванням (2.14), отримаємо:

$$B = \frac{W(b) - W_0 S(kb)}{T(kb)}.$$

Якщо b – координата вузла коливань x_1 або x_2 (рис. 2.4), то $W(b)=0$ і тому одержимо:

$$B = W_0 \frac{S(kb)}{T(kb)}.$$

При відомих A , B , k і b легко розрахувати величину прогину W і напруги σ на розглянутій ділянці зразка за формулами (2.12) та (2.13).

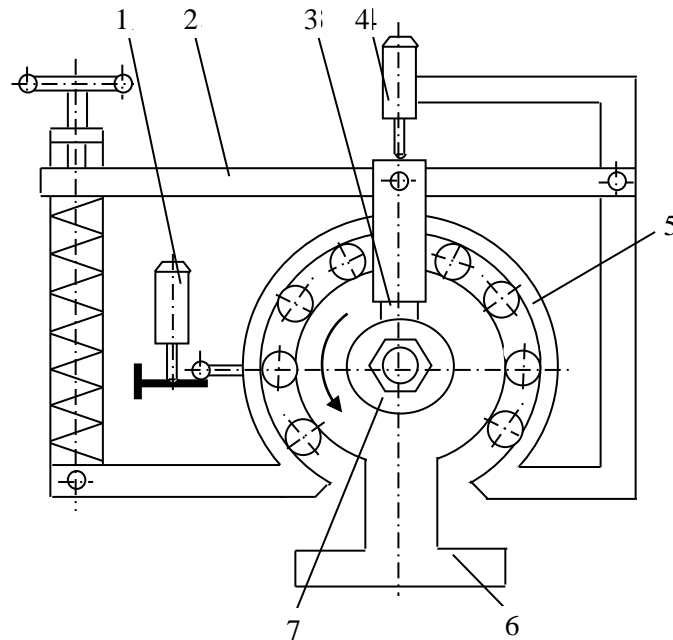
Таким чином, на основі отриманих результатів, що характеризують вплив конструкційних та технологічних факторів, будуються криві втому.

Отже, розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України методика високочастотних випробувань на втому відрізняється від існуючих простотою конструкції досліджуваного зразка і способом його закріплення. Це дозволяє більш ефективно використовувати потужність резонансної установки, так як не потрібно використовувати спеціальні пристрої та додаткові деталі кріплення, які не є активними елементами та вимагають додаткової витрати енергії, яка підводиться до вібратора.

2.3. Методика триботехнічних випробувань зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони.

Дослідження на тертя та зношування зразків здійснювалися на базі Національного технічного університету України “Київський політехнічний

інститут” . Триботехнічні характеристики зміцнених поверхневих шарів визначалися на машині тертя [150, 205], схема вузла тертя якої зображена на рис. 2.4.



1 – датчик сили тертя із динамометричною пружиною; 2 – важільна система навантаження; 3 – зразок, що досліджується; 4 – датчик лінійного зношування; 5 – каретка, що гойдається; 6 – корпус; 7 – ролик – контртіло.

Рисунок 2.4 – Схема вузла тертя установки [151]

Вузол тертя машини складається з корпусу 6, усередині якого на підшипниках встановлено основний вал. Співвісно з валом на підшипниках, встановлених на корпусі, змонтовано каретку, що гойдається 5. На торці каретки закріплено важільну систему навантаження 2. Досліджуваний зразок 3 із тримачем зразка встановлено на рухомому важелі системи навантаження. Контртіло 7 у вигляді змінного ролика встановлено на основному валі, привід якого здійснюється через клиноремінну передачу зі змінними шківками. Пружина притискає зразок до зовнішньої циліндричної поверхні контртіла, при обертанні якого сила тертя, що утворюється від цього, прагне повернути зразок та пов'язану з ним каретку навколо вісі. Повертання каретки перешкоджає динамометрична пружина, протарована по величині сили тертя F_{TP} . Співпадіння вісі валу з віссю гойдання каретки забезпечує збереження

контакту зразка та контртіла при повертанні каретки.

У процесі досліджень за допомогою електронної вимірювальної системи моделі 217 з індуктивними датчиками переміщень моделей 234М безперервно вимірювалась та реєструвалась сила тертя F_{TP} . Коефіцієнт тертя розраховувався як частка від ділення сили тертя F_{TP} на зусилля притискання P .

Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів у вказаних умовах згідно з методикою [150] розраховували інтенсивність зношування I_V [кг/см² на 1000 м шляху тертя] за формулою:

$$I_v = \frac{10^3 \cdot \Delta V}{S_k \cdot L}, \quad (2.15)$$

де ΔV – вагове зношування (кг); S_k - площа контакту (см²); L - шлях тертя (м).

Величина ΔV визначалася як різниця у вазі зразка до та після випробувань. Зважування проводилося на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед зважуванням зразки промивали бензином Б-70 (ГОСТ 1012-72) та просушували.

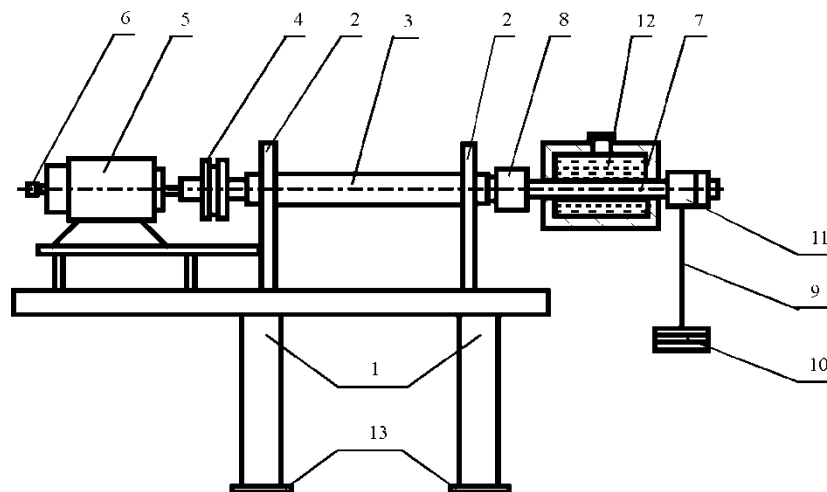
2.4. Методика дослідження корозійної стійкості конструктивних елементів бурильної колони.

Дослідження зразків здійснювалося на базі Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” . Оцінку корозійної стійкості проводили за значенням питомого збільшення маси зразків у залежності від часу випробувань. Усереднення проводили за трьома значеннями [152]. Для визначення величини питомого збільшення маси зразка проводили 10-годинні досліді плоских зразків в алундових тиглях на спокійному повітрі при 973 °К. 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).

2.5. Методика втомних випробувань замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині.

Дослідження проводилися в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Випробування проводяться в умовах корозійної втоми при консольному згині з обертанням частотою 15,2 Гц на стенді ЗКШ-25, принципова схема якого приведена на рис. 2.5.



1 – рама; 2 – підшипник; 3 – вал; 4 – муфта; 5 – електродвигун; 6 – лічильник обертів; 7 – перехідна муфта; 8 – вал; 9 – вісь; 10 – вантаж; 11 – зразок; 12 – камера; 13 – подушка.

Рисунок 2.5 – Схема установки для втомних випробувань насосних штанг при циклічному згині [153, 154]

Установка змонтована на рамі 1. В стійках 2 на підшипниках розміщено вал 3, який через муфту 4 з'єднується з електродвигуном 5. До електродвигуна приєднано лічильник обертів 6. Зразок 7 через перехідну муфту 8 з'єднується з валом 3. За допомогою осі 9 і підшипника 11 зразок навантажується вантажем 10. Робоче середовище розміщується в камері 12. Для зменшення вібрації установка розміщена на подушках 13. В момент злому зразка електродвигун

автоматично вимикається за допомогою вимикача.

Для випробувань замкових різьбових з'єднань використовували 3% розчин NaCl, пластову воду, нафтові емульсії, а також ці ж середовища при насиченні їх сірководнем до граничної концентрації.

Декілька разів на добу проводився ультразвуковий контроль дефекту в різьбовому з'єднанні. Для цього машину ЗКШ-25 зупиняли, знімали камеру 12 і через 20-30 хвилин запускали знову.

Для дослідження втомної стійкості було розроблено моделі замкового різьбового з'єднання 3-26, які виготовляли з сталі групи міцності Д, і вони були геометрично подібні різьбі бурильних замків 3-42 (ГОСТ 7918-75) для геологорозвідувальних бурильних труб [211] (Рис.2.6).

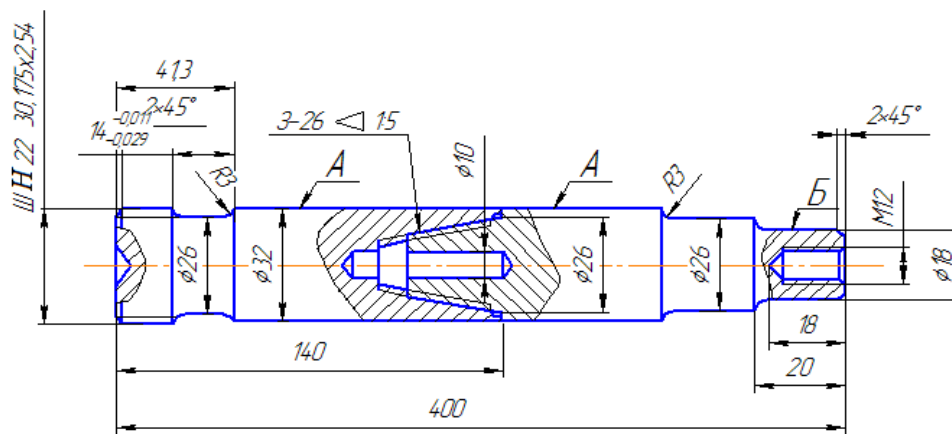


Рисунок 2.6 - Модель замкового різьбового з'єднання 3-26 [210]

При моделюванні були збережені розміри конусності, кроку різьби, висоти профілю та радіуса закруглення впадини. При цьому довжина різьби, діаметр більшого конуса ніпеля та внутрішній діаметр моделі пропорційно зменшували. Муфтову і ніпельну частини зразка обробляли методом імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування.

Зразки після азотування згвинчували оптимальним крутним моментом $M_{кр} = 420-450 \cdot Н \cdot м$.

2.6. Методики дослідження властивостей зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони.

2.6.1. Дослідження мікротвердості зміцненого поверхневого шару. Дослідження мікротвердості зміцнених поверхневих шарів проводилися в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України відповідно до ГОСТ 9450-76 з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М, кут між протилежними гранями алмазної пірамідки – 136° , навантаження – 0,98 Н, час витримування під навантаженням – 20 с., крок вимірювання по товщині зразка – 30...40 мкм. Визначали середнє значення мікротвердості за результатами п'яти вимірювань [152].

2.6.2. Мікрорентгеноспектральний, мікроструктурний та рентгенофазовий аналіз зміцненого поверхневого шару. Дослідження зразків здійснювалося на базі Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” .

Визначення хімічного складу поверхні зразків проводилося на основі методики кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу. Зразки приклеювалися струмопровідним полімерним клеєм до поверхні робочих столиків растрового електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-101А. Знімання зображень структур та відповідних мікрорентгенівських спектрів проводилося на РЕММА-101А при напрузі прискорення 30 кВ. Реєстрування піків важких елементів (від натрію и вище) відбувалася за допомогою системи енерго-дисперсійного аналізу (EDS), блок детектора та попередній підсилювач якої охолоджувалися до температури $-130^{\circ}\text{C} \dots -160^{\circ}\text{C}$. Реєстрування піків легких елементів (N та C) проводилася за допомогою системи хвильового рентгенівського мікроаналізу (WDS) [152].

Обробка інтегрального мікрорентгенівського спектру для отримання атомного вмісту елементів у зразках проводилася за допомогою фірмового програмного забезпечення приладу РЕММА-101А. В основі роботи пакету

лежить ZAF-метод внесення поправок в реальну інтенсивність зареєстрованого піку (поправки на атомний номер, на сенсibilізовану флуоресценцію та на поглинання).

Мікроструктурний аналіз проводився з використанням оптичного мікроскопу “Neophot – 30” при збільшеннях $\times 50 \dots 500$. Для виявлення мікроструктури шліфи піддавали хімічному травленню у трьохвідсотковому розчині азотної кислоти HNO_3 в етиловому спирті $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ [152].

Рентгенофазовий аналіз проводився для уточнення фазового складу зразків. Дослідження проводились на дифрактометрі “Дрон-4-13С” у залізному характеристичному випромінюванні [156]. Дифракційні максимуми реєструвались у дискретному режимі з кроком $0,1^\circ$, час експозиції у точці – 2 с. У деяких випадках використовувався селективно поглинаючий фільтр. Фазовий склад визначався порівнянням кутових положень зареєстрованих дифракційних максимумів з кутами відбиття фаз, утворення яких можливе в досліджених зразках. Для порівняння використовувались дані з бібліотеки ASTM.

2.6.3. Дослідження залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі. Дослідження зразків здійснювалося на базі Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Прецизійне вимірювання параметрів кристалічної решітки, а відповідно, і вимірювання макронапружень проводились на дифрактометрі ДРОН-4-13С.

Рентгенографічний аналіз макронапружень виконувався в автоматичному режимі збору інформації. Зйомка проводилась по методу Брега-Брентано. Макронапруження вимірювались $\sin^2\psi$ - методом (методом багатократних знімачів) [157, 158]. При визначенні макронапружень використовували $\text{Fe-K}_{\alpha 1}$ випромінення, для отримання якого використовувався вигнутий кристал–монохроматор (LiF). Товщину рентгенографічно досліджуваного шару h визначали за співвідношенням:

$$h = -(1/\nu K) \ln(1 - R),$$

де $K = \cos ek(\theta - \psi) + \cos ek(\theta + \psi)$;

ν - лінійний коефіцієнт ослаблення рентгенівських променів у зразку;

R - доля випромінення, відбита шаром товщиною h ($R = 0,9$);

ψ - кут між напрямом падіння рентгенівського променя та нормаллю до поверхні зразка.

2.7. Методика оцінки напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів використанням кінцево-елементного аналізу.

Оцінка напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів з використанням кінцево-елементного аналізу проводилися в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Відомо, що метод кінцевих елементів має вирішальне значення в прогнозуванні працездатності елементів бурильної колони при дії експлуатаційних факторів [159, 199].

В залежності від виду розрахунку, складності задачі та направленості того, чи іншого програмного забезпечення для конкретного розрахунку використовуємо програмний продукт NASTRAN, який має спільну розрахункову базу на основі методу кінцевих елементів і є однією з програм кінцево-елементного аналізу. Ці програми обумовлені використанням їх для розрахунку складних задач механіки деформованого твердого тіла, задач теплопровідності, теорії коливань та інших специфічних розрахунків таких як розрахунок елементів конструкції на міцність, або оптимізація конструкції за граничними напруженнями та поперечним перетином деталі. При цьому є можливість моделювати практично всі типи матеріалів, включаючи композитні.

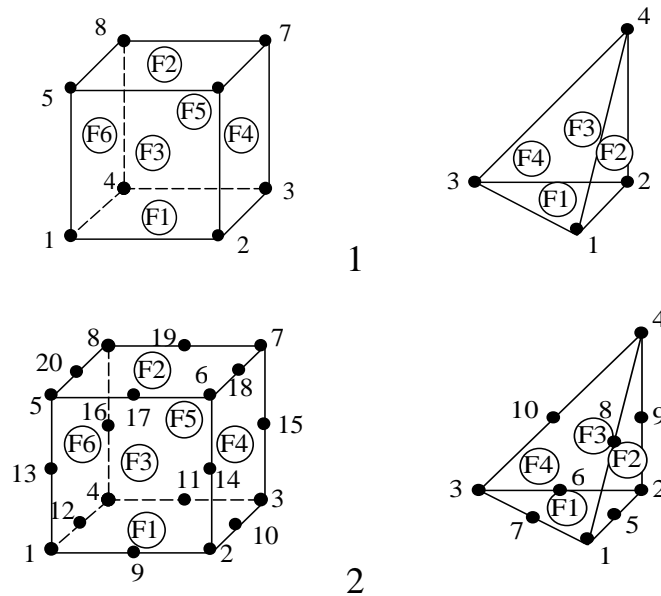
Оскільки конструкційні елементи бурильної колони працюють у важких динамічних умовах навантаження, та мають складні геометричні форми, то для розрахунку напружено-деформованого стану доцільно застосовувати метод кінцево-елементного аналізу [160, 161]. Для розрахунку напружено-деформованого стану необхідно врахувати особливості геометричних параметрів елементів бурильної колони, властивості конструкційного матеріалу, вид розрахунку (статичний, динамічний та ін.), та умови силового й температурного навантаження, що діють на неї.

Важливим етапом у скінчено-елементному аналізі є побудова розрахункової моделі і її кінцево-елементної сітки. Дискретизація досліджуваної області на кінцеві елементи є складною і відповідальною процедурою, від якої суттєво залежить якість одержаного рішення. Програмний комплекс NASTRAN дозволяє без використання допоміжних САД-програм будувати геометрію та кінцево-елементну сітку у своєму середовищі, або імпортувати з інших програм, таких як AutoCAD, ACIS, Parasolid та ін.[162]. Генерація кінцево-елементної сітки по твердотільній моделі проводиться автоматично.

Побудована об'ємна геометрична модель зразка перетворюється в кінцево-елементну сітку у вигляді просторових кінцевих елементів, які з'єднані між собою у вузлах. Кінцеві елементи в NASTRAN можуть мати перший або другий порядок апроксимації. Для розв'язання задачі використовуємо гексагональні та тетраїдальні типи кінцевих елементів першого порядку апроксимації – без проміжних вузлів та кінцеві елементи другого порядку – з проміжними вузлами (рис. 2.7) [162].

При створенні кінцево-елементної сітки зразків необхідно врахувати, що найбільш густа сітка необхідна там, де градієнт температур, деформацій або напружень є ймовірно більшим. Менш густа сітка використовується в зонах із більш або менш постійними деформаціями або напруженнями, а також в областях, які не потребують детального аналізу. Також, лінійні елементи 1-го порядку наближення вимагають більш густої сітки, ніж квадратичні з його

апроксимацією.



1– першого (лінійні) порядку апроксимації; 2 – другого (параболічні) порядку апроксимації.

Рисунок 2.7 – Тривимірні скінченні елементи та шаблони нумерації вузлів і поверхонь [199]

На рис. 2.8 представлено схему дослідження напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцево-елементного аналізу з використанням програмного пакету NASTRAN [199].

Обробку результатів здійснювали в наступній послідовності:

- ідентифікували навантаження шляхом візуалізації переміщень;
- визначали величину еквівалентних напруг у будь-якій точці зразка й одержували картину розподілу напруг по його поверхні [199].

$$\sigma_{екв} = \left\{ \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot \sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$ – еквівалентні напруги, Па.

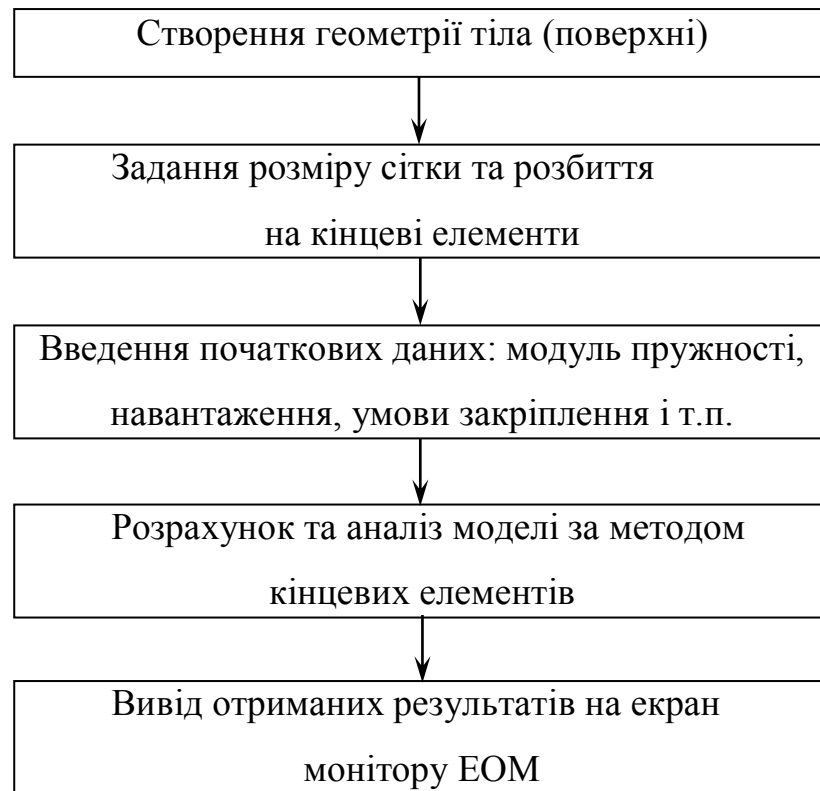


Рисунок 2.8 – Схема проведення дослідження напружено-деформованого стану за допомогою методу кінцево-елементного аналізу [199]

Висновки до розділу 2

1. Розкрито методики експериментальних досліджень для оцінки підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦПА, що дозволить:

- логічно упорядкувати результати математичного моделювання і експериментальні дослідження;
- встановити закономірності впливу параметрів технологічного процесу на механічні властивості зміцненого поверхневого шару;
- вибрати оптимальні параметри технологічного процесу за обраними критеріями оптимізації.

2. Визначено, що використовуючи методику планування експериментальних досліджень та математичної обробки статистичних даних можна ефективно вирішити задачу щодо оптимізації процесу створення зміцнених дифузійно-азотованих поверхневих шарів, а також встановити

залежність їх механічних властивостей від конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів.

3. Визначено методики проведення комплексу досліджень щодо визначення значень механічних властивостей зміцнених поверхневих шарів, їх структури, фазового складу, рівня й розподілу залишкових напружень у зміцнених шарах.

4. Показано, що для повної оцінки встановлення закономірностей впливу параметрів технологічного процесу на властивості зміцненого поверхневого шару необхідно удосконалити процес ВПА і провести комплекс експериментальних досліджень на зносостійкість, корозійну стійкість та багатоциклову втому.

РОЗДІЛ 3

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМПУЛЬСНОГО ВАКУУМНОГО ГАЗОТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ

У розділі проведено вибір критеріїв оптимізації та керованих конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів, побудовано план експерименту. Удосконалено технологічний процес ІВГТЦПА, а також удосконалено модель дифузійного насичення поверхневих шарів деталей азотом. Визначено вплив параметрів удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцненого поверхневого шару.

3.1. Вибір критеріїв оптимізації, керованих факторів та побудова плану експерименту.

Дослідження технологічних процесів формування зміцнених захисних поверхонь пов'язана з вирішенням задач щодо їх оптимізації. Ефективність прийнятих оптимізаційних рішень залежить від правильності вибору критеріїв, за якими буде оцінюватися працездатність сформованого зносостійкого поверхневого шару у заданих умовах експлуатації.

Критерії оптимізації в роботі обиралися з урахуванням наступного комплексу вимог [163, 164, 165]: простий, зрозумілий фізичний зміст критерію та достатньо повне характеризування ним об'єкту або процесу, що досліджується; відповідність кожному значенню незалежних змінних одного (із точністю до випадкової помилки) значення відгуку; відтворюваність критерію, тобто збігання (з точністю до помилки експерименту) отриманих його значень при повторенні дослідів у номінально однакових умовах; вимірюваність значень критерію при будь-якій комбінації обраних рівнів факторів; ефективність критерію як з точки зору досягнення мети, так і у

статистичному відношенню.

З огляду на те, що основною задачею дослідження є підвищення працездатності ЗРЗ БК шляхом підвищення механічних властивостей зміцнених поверхневих шарів, у якості критеріїв оптимізації обиралися параметри, які можуть найбільш вичерпно та якісно охарактеризувати саме ці властивості матеріалів.

Одним із важливих термінів при розробці технології і техніки буріння свердловин є міцність елементів бурильної колони [166], яка і визначає працездатність замків БК. У якості показників міцності замків БК вибирається міцність при різноманітних видах навантаження в умовах впливу оточуючого середовища [167, 168] та властивостей поверхні робочих деталей [169, 170, 171]. В результаті аналізу умов роботи найбільш ЗРК БК, встановлено одночасний вплив циклічних навантажень та агресивного середовища [172, 173, 174].

З огляду на те, що однією з основних задач дослідження є підвищення триботехнічних властивостей зміцнених деталей, за критерій оптимізації обрано параметр, який може найбільш вичерпно та якісно охарактеризувати саме цю властивість матеріалу, а саме зношування. Однією з найбільш інтегральних характеристик зношування, яка є похідною від структурно-фазового та напружено-деформованого станів контактуючих поверхонь, фізико-механічних властивостей матеріалів, умов протікання й кінетики процесу, є інтенсивність зношування. Вона визначається як здатність матеріалу здійснювати опір зношуванню у визначених умовах тертя і залежить від виду зношування. Інтенсивність зношування, у свою чергу, визначає ступінь зносу і пошкодження контактуючих поверхонь деталей.

Продовжити терміни експлуатації ЗРЗ БК до їх зносу – основна мета вирішення проблеми корозії металів. Важкість протидії корозії полягає в тому, що руйнування металів під впливом факторів середовища – істотний термодинамічно вигідний процес, який направлений на збереження рівноваги у природі.

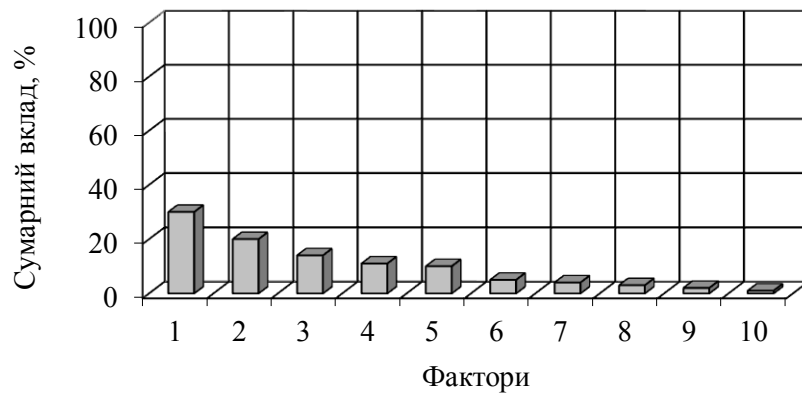
Так як процеси корозії, що пов'язані із впливом факторів середовища, незворотні і часто приводять до відмов, їх необхідно виявляти на ранніх стадіях, класифікувати, давати кількісну оцінку ефекту пошкодження і прогнозувати небезпеку розвитку у випадку неприйняття заходів щодо підвищення захисту. Тільки встановлення причин корозійного процесу дозволяє вірно вибрати метод захисту.

Таким чином, в якості критеріїв оптимізації технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару вибрано (табл. 3.1.): зносостійкість зміцненого матеріалу, що характеризується інтенсивністю зношування; корозійна стійкість зміцненого матеріалу, що характеризується питомим збільшенням маси зразків у залежності від часу випробувань; границі витривалості при симетричному циклі.

Таблиця 3.1 – Критерії оптимізації

№	Назва критерію оптимізації	Мета	Позначення	Обмеження
1	Інтенсивність зношування	МІНІМУМ	Y_1	–
2	Питоме збільшення маси зразка	МІНІМУМ	Y_2	–
3	Границя витривалості	МАКСИМУМ	Y_3	–

При виборі керованих факторів до вивчення процесу підходили комплексно, тобто враховувався вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на визначені критерії оптимізації. Використовуючи методи експертної оцінки [175, 176, 177] і, зробивши серію відсіюючих експериментів, було отримано ранжируваний ряд факторів, які впливають на якість технологічного процесу ІВГТЦПА (рис. 3.1) та на основі аналізу ранжирування визначено групу факторів, що більше за всіх впливають на величину критеріїв оптимізації, та встановлено рівні їх варіювання.



1 – час дифузійного насичення; 2 – тиск реакційного газу; 3 – склад реакційного газу; 4 – температура газу; 5 – величина температурного циклу; 6 – робочий струм процесу насичення; 7 – робоча напруга процесу насичення; 8 – експлуатаційне навантаження; 9 – швидкість ковзання; 10 – матеріал деталі.

Рисунок 3.1 – Ранжируваний ряд конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів

Таким чином, в матрицю планування, як керовані фактори, були внесені: час дифузійного насичення, тиск реакційного газу, склад реакційного газу, температура газу величина температурного циклу та експлуатаційне навантаження в умовах тертя (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Фактори та рівні їх варіювання

№	Фактори	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		
6	Навантаження, МПа	X_6	2,5...25		

Згідно умовам формування зміцненого поверхневого шару значення

факторів X_2 та X_4 змінюються, а саме: тиск реакційного газу періодично (з періодом 15...30 хв.) знижується до нуля, а температура процесу коливається у межах 25...35°C по обидва боки від вказаних рівнів варіювання. Це зумовлено застосуванням циклів по насичуючій здатності атмосфери та термоциклів [177].

Використовуючи значення таблиці 3.2 у роботі згенеровано план експерименту на основі ЛП_т-чисел, який представлено в кодованих значеннях у таблиці 3.3 та у натуральних значеннях табл. 3.4., за якими проводилось формування та дослідження зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА.

Таблиця 3.3 – План експерименту в кодованих координатах

№ досліду	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
2	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75
3	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25
4	0,125	0,625	0,875	0,875	0,625	0,125
5	0,625	0,125	0,375	0,375	0,125	0,625
6	0,375	0,375	0,625	0,125	0,875	0,875
7	0,875	0,875	0,125	0,625	0,375	0,375
8	0,0625	0,9375	0,6875	0,3125	0,1875	0,0625
9	0,5625	0,4375	0,1875	0,8125	0,6875	0,5625
10	0,3125	0,1875	0,9375	0,5625	0,4375	0,8125
11	0,8125	0,6875	0,4375	0,0625	0,9375	0,3125
12	0,1875	0,3125	0,3125	0,6875	0,5625	0,1875
13	0,6875	0,8125	0,8125	0,1875	0,0625	0,6875
14	0,4375	0,5625	0,0625	0,4375	0,8125	0,9375
15	0,9375	0,0625	0,5625	0,9375	0,3125	0,4375
16	0,03125	0,53125	0,40625	0,21875	0,46875	0,28125

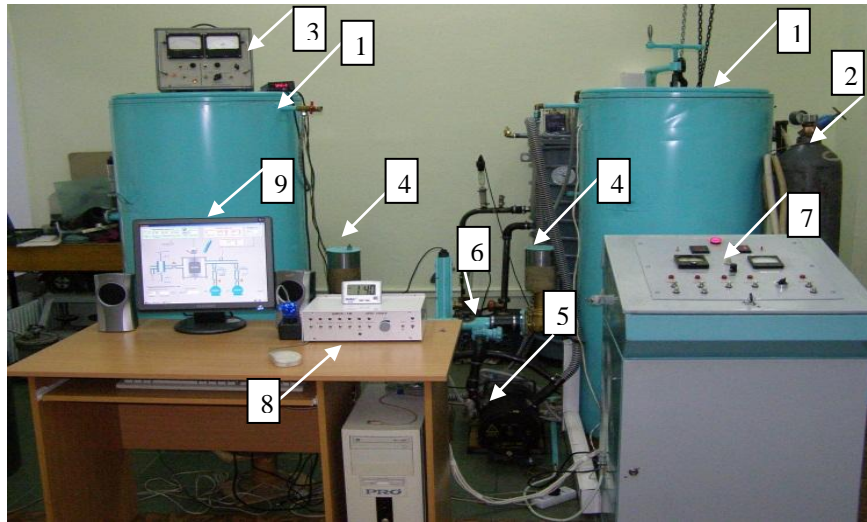
Таблиця 3.4 – План експерименту в натуральних координатах

№ дослідю	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

3.2. Удосконалення технологічного процесу формування зміцнених поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони.

3.2.1. Технологічна база вакуумного іонно-плазмового азотування. Технологічний процес ВІПА розроблено в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України та реалізовано на установці ВІПА-1, загальний вигляд якої наведено на рис. 3.2 [1, 84, 85, 178, 179, 206].

Установка складається з вакуумної камери; системи відкачування повітря та газів (вакуумування); системи забезпечення газом; системи вимірювання та регулювання температури; системи електроживлення; автоматизованої системи контролю та управління технологічним процесом [206].



1 – вакуумна камера; 2 – балони з робочим газом; 3 – блок задавання та регулювання напруги; 4 – клапани аварійного відключення насосів КЕМ-1 та КЕМ-2; 5 – стартовий насос; 6 – робочий насос; 7 – блок індикації та регулювання температури (БІРТ); 8 – блок комунікації з ПЕОМ; 9 – інформаційний екран.

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд установки ВПА-1

Для забезпечення ведення процесу за заданими режимами в залежності від необхідної структури та товщини дифузійного шару, здійснення автоматичного контролю параметрів технологічного процесу, підвищення безпеки робіт та відтворюваності результатів поверхневого зміцнення на базі Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України було створено діючий комплекс технологічного забезпечення процесу зміцнення поверхневих шарів деталей ВПА на основі АСКУ, основні параметри та функціональна схема якої наведені на рис. 3.3 [1].

Під час технологічного процесу ІВГТЦПА АСКУ виконує наступні функції програмного забезпечення [1]:

- відображення значень поточних параметрів у реальному часі, аварійних повідомлень, архіву історії зміни параметрів на дисплеї автоматизованого робочого місця (АРМа) диспетчера (рис. 3.4);

- вимірювання температури за допомогою пірометру;

- обмін даними з електронним пристроєм установки;
- автоматичне управління температурою процесу за допомогою ПЕОМ;
- генерування повідомлень про критичний та аварійний стан технологічних параметрів процесу та стабілізація його режимів;
- архівування історії зміни параметрів;
- експорт даних архіву історії у таблиці Microsoft Excel.

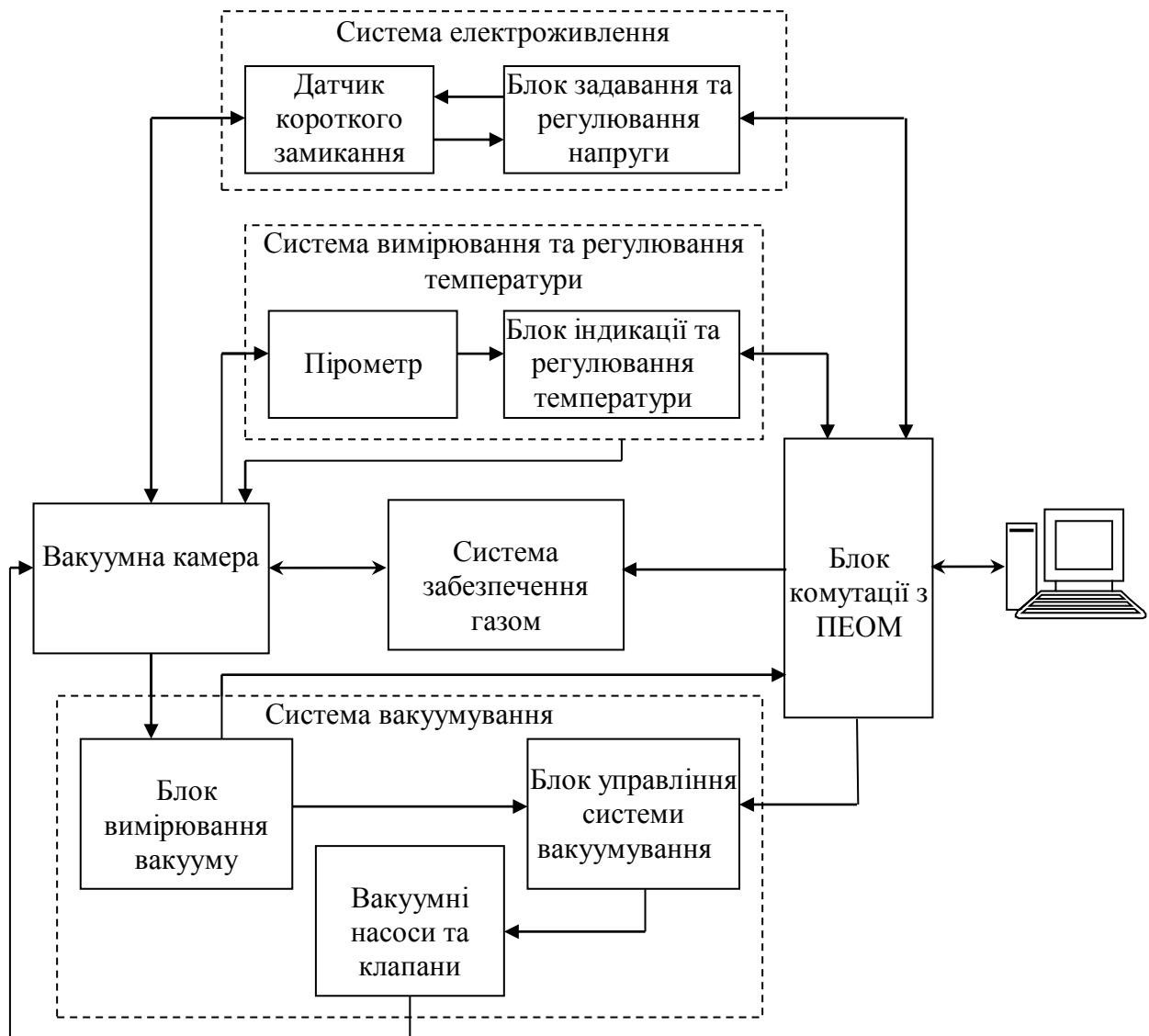


Рисунок 3.3 – АСКУ технологічним процесом вакуумного іонно-плазмового азотування [1]

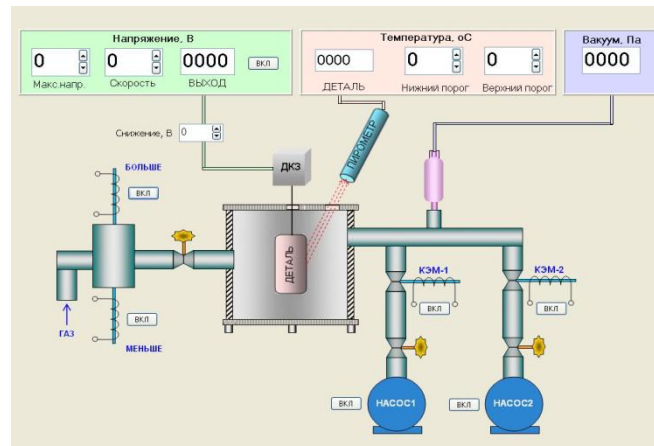


Рисунок 3.4 – Дисплей АСКУ технологічним процесом ВПА [1]

3.2.2. Удосконалення технологічного процесу зміцнення поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням. Відомий спосіб ХТО деталей з різьбовою поверхнею, при якому поміщають деталь у піч, герметично закривають піч, під'єднують шланги для подачі та відведення робочого газу, продувають піч до повного видалення з неї повітря, нагрівають деталь за допомогою нагрівачів до 350 °C – 510 °C, здійснюють подачу робочого газу та забезпечують задані температуру деталі й склад атмосфери у печі за допомогою системи контролю та регулювання температури, тиску та ступеню дисоціації аміаку, проводять ізотермічне азотування деталі у печі протягом 10 – 24 годин, охолоджують деталь, виймають деталь з печі [178].

Недоліками відомого способу поверхневого зміцнення сталевих деталей газовим азотуванням є велика складність, великі енерговитрати та наявність деформації деталей після обробки, тривалість ізотермічного азотування, який не гарантує високоякісного зміцнення у зв'язку з окрихчуванням і нерівномірним розвитком азотованого шару на різьбовій поверхні.

Найбільш близьким технічним рішенням, обраним за прототип є спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей ВПА, при якому поміщають деталь у контейнер, з'єднують деталь з від'ємним полюсом джерела струму, з'єднують стінки контейнера з позитивним полюсом джерела струму, відкачують повітря

з контейнеру до тиску 133 Па за допомогою вакуумної системи, продувають контейнер робочим газом при тискові 1330 Па за допомогою системи газопостачання, відкачують робочий газ з контейнеру до тиску 27 – 53 Па за допомогою вакуумної системи, подають напругу 1100 – 1400 В на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління, збуджують тліючий розряд, здійснюють катодне розпилення протягом 5 – 60 хв., при якому деталь нагрівається до 250 °С – 400 °С, понижують напругу до робочої за допомогою системи електричного живлення та управління, підвищують тиск робочого газу до 25 – 1330 Па за допомогою системи газопостачання, здійснюють дифузійне насичення протягом 4 годин, при якому подають пульсуючу напругу 1000 – 1200 В з тривалістю імпульсу 10 – 20 мс та величиною періоду подавання імпульсів 40 мс на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління, при цьому припиняють циклічно подавання робочого газу у контейнер з тривалістю напівциклу 15...30 хв. та змінюють температуру циклів насичення і деазотації вище температури евтектоїдного перетворення або нижче температури евтектоїдного перетворення, після дифузійного насичення припиняють електроживлення обладнання та охолоджують деталь до кімнатної температури під вакуумом, виймають деталь з контейнера [179].

Недоліками відомого способу поверхневого зміцнення сталевих деталей вакуумним іонно-плазмовим азотуванням у тліючому розряді, обраного за прототип, є відсутність подачі робочого газу протягом всього процесу зміцнення, а саме: нагрівання, термоциклічного дифузійного насичення та охолодження. Крім цього, після закінчення насичення вимикають електроживлення і охолодження деталі здійснюють без впливу на неї тліючого розряду. Відсутність робочого газу на етапі нагрівання і охолодження, а також обробки у плазмі тліючого розряду при охолодженні не дозволяє отримати рівномірний і однорідний зміцнений поверхневий шар та зберегти розмірну точність і шорсткість різьби.

В основу удосконаленого технологічного процесу поставлено завдання

шляхом усунення недоліків прототипу забезпечити підвищення якості різьбових поверхонь деталей, продуктивність і скорочення часу обробки, зменшення витрат ресурсів шляхом азотування у процесі нагрівання і охолодження. Поставлене завдання вирішується за рахунок удосконалення способу ВПА у пульсуючому тліючому розряді сталевих деталей із різьбовою поверхнею на етапах її нагрівання, термоциклічного дифузійного насичення і охолодження

Спосіб поверхневого зміцнення деталей ІВГТЦПА, реалізується наступним чином: деталь із різьбовою поверхнею поміщають у контейнер, з'єднують деталь з від'ємним полюсом джерела струму, з'єднують стінки контейнера з позитивним полюсом джерела струму, відкачують повітря з контейнеру до тиску 133 Па за допомогою вакуумної системи, продувають контейнер робочим газом при тискові 1330 Па за допомогою системи газопостачання, створюють тиск робочого газу до 250 Па і тримають незмінним, подають напругу 1100 – 1400 В на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління, збуджують тліючий розряд, здійснюють катодне розпилення протягом 5 – 60 хв., при якому деталь нагрівається до 400 °С (етап нагрівання), понижують напругу до робочої за допомогою системи електричного живлення та управління, підвищують тиск робочого газу до 25 Па – 1330 Па за допомогою системи газопостачання, здійснюють дифузійне насичення протягом 2 – 4 години, при якому подають пульсуючу напругу 1000 – 1200 В з тривалістю імпульсу 10 – 20 мс та величиною періоду подавання імпульсів 40 мс на деталь та стінки контейнера за допомогою системи електричного живлення та управління, при цьому припиняють циклічно подавання робочого газу у контейнер з тривалістю напівциклу 15...30 хв. та змінюють температуру циклів насичення азотом і деазотації вище температури евтектоїдного перетворення або нижче температури евтектоїдного перетворення при цьому температура деталі підвищується до 600 °С (етап дифузійного насичення), не припиняючи електроживлення, надаючи можливість деталі знаходитися у плазмі тліючого

розряду до температури 400 °С безпосередньо після нагрівання, охолоджують (етап охолодження) деталь протягом 0,5 – 1 години до кімнатної температури в середовищі робочого газу, виймають деталь з різьбовою поверхнею із контейнера [1, 203].

Алгоритм технологічного процесу ІВГТЦПА представлено на рис. 3.5. Технологічний процес ІВГТЦПА складається з трьох послідовних блоків: підготовчих операцій; дифузійного насичення деталей; завершальних операцій.

Підготовчі операції полягають у підготовці деталей та обладнання, а саме: промивання та просушування деталей і вакуумної камери, перевірка герметичності агрегатів системи вакуумування тощо. Дифузійне насичення деталей включає: катодне очищення; власне дифузійне насичення; охолодження у вакуумній камері.

Протягом всього процесу ІВГТЦПА важливо ретельно контролювати та витримувати визначені значення технологічних параметрів. Завершальні операції полягають у вийманні оброблених деталей з вакуумної камери, промиванні та протиранні камери.

Імпульсний режим ВГТЦПА (рис. 3.6) реалізується наступним чином: змінний струм через понижуючий трансформатор 6 (рис. 3.7) поступає на вхід електронного блоку управління 7, далі – на два комутуючі тиристори 1. Блок управління за допомогою змінного опору 8 дозволяє змінювати тривалість імпульсів подавання напруги на тиристори. Комутуючі тиристори регулюють амплітуду струму та тривалість його проходження по первинній обмотці підвищуючого трансформатора 2. Із вторинної обмотки трансформатора 2 підвищена до 1000...1200 В напруга подається на випрямляючий діодний місток 3, на виході з якого отримується однополярна пульсуюча напруга, яка, у свою чергу, подається на катод-деталь 4 та анод - стінки вакуумної установки 5.

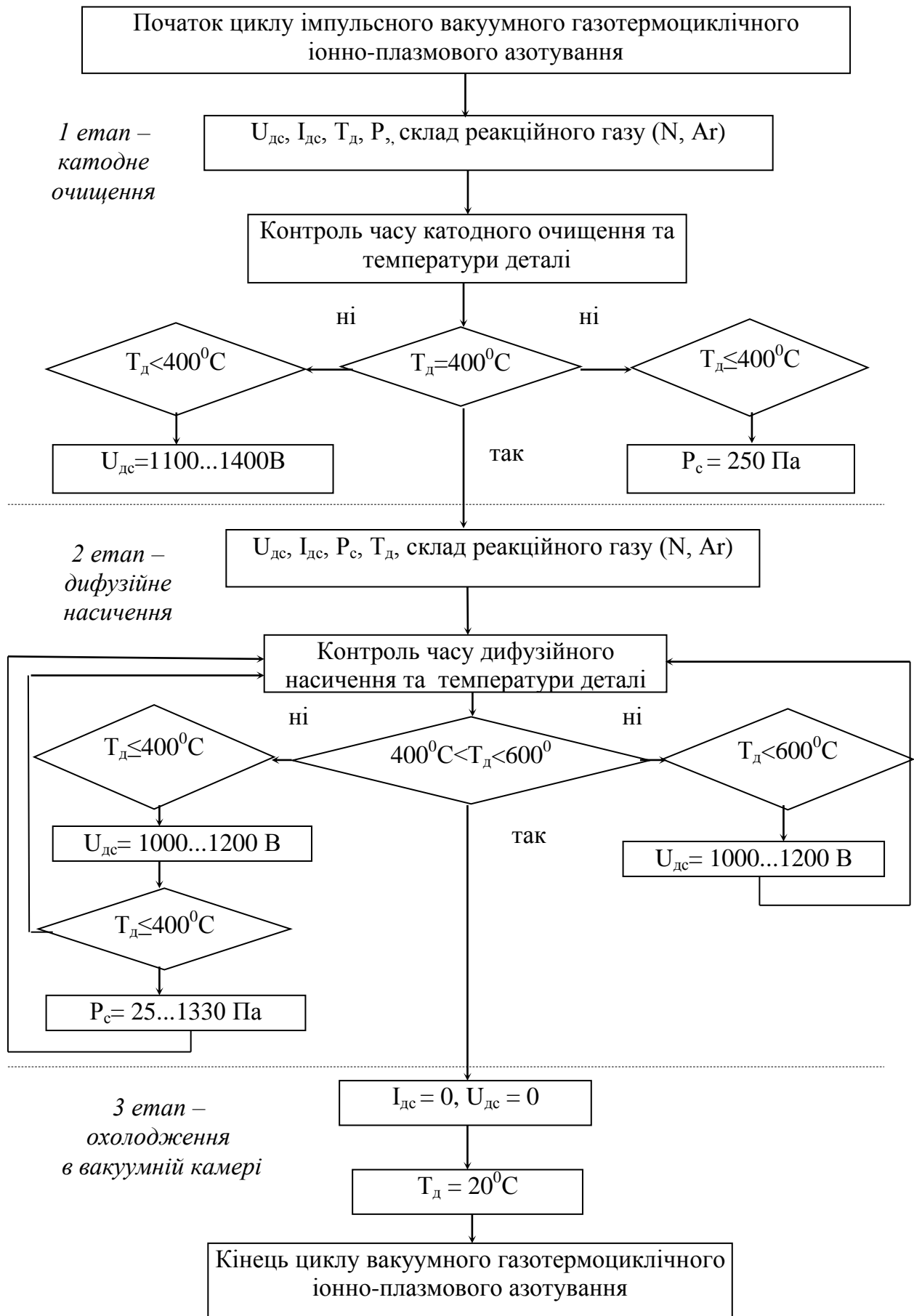
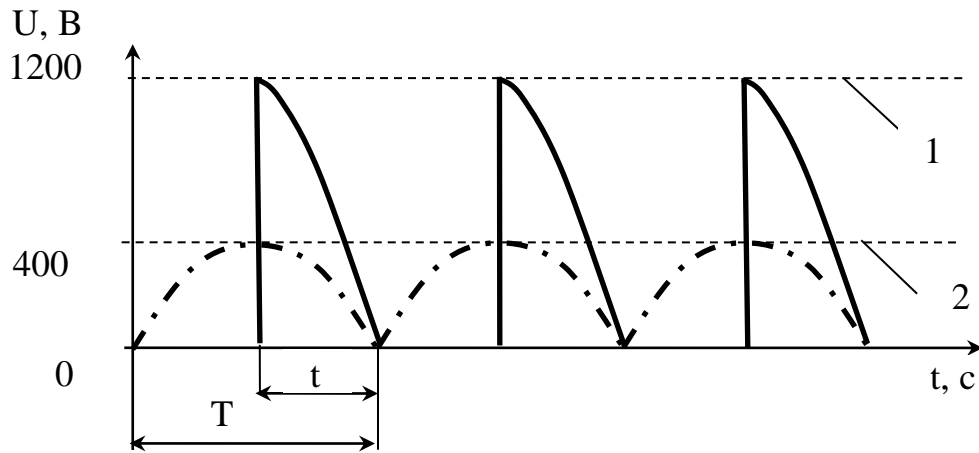
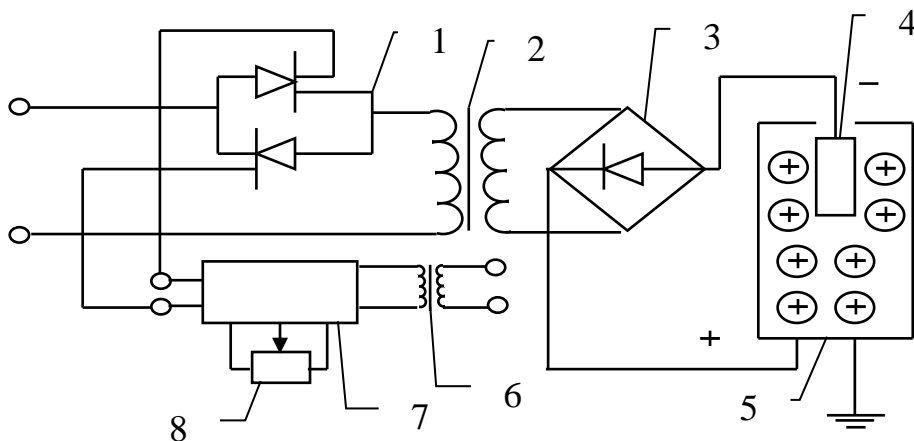


Рисунок 3.5 – Алгоритм технологічного процесу ВГТЦПА [1]



1 – режим із пульсуючою напругою; 2 – режим із постійною напругою.

Рисунок 3.6 – Параметри струму, що подається на катод-деталь та анод-стінки вакуумної установки [1]



1 – комутуючі тиристори; 2 – підвищуючий трансформатор; 3 – діодний місток; 4 – катод-деталь; 5 – анод-стінка вакуумної камери; 6 – понижуючий трансформатор; 7 – блок управління; 8 – змінний опір.

Рисунок 3.7 – Схема установки для реалізації імпульсного режиму ВГТЦПА [1]

3.3. Удосконалення моделі процесу формування зміцнених поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони.

При застосуванні не удосконаленого методу ВПА використовують лише окремі потенційні можливості підвищення його ефективності. Зараз залишаються невирішеними питання щодо недостатньо високої швидкості насичення поверхневих шарів металу азотом (через низький робочий тиск газу) та можливості переходу тліючого розряду у дуговий, що може призвести до оплавлення поверхні деталі, яку обробляють [187]. Встановлено (див. п.п. 1.4.), що для підвищення ефективності технологічного процесу ВПА його необхідно здійснювати в умовах газотермоциклічного режиму та імпульсного струму.

Проте відомо, що процеси дифузійного насичення при циклічних змінах параметрів відрізняються від процесів ізотермічної дифузії в стаціонарних умовах. Особливістю імпульсної термоциклічної обробки є створення рушійної сили, що забезпечує деяку додаткову дрейфову швидкість дифузанта та появу явищ, подібних до електропластичного ефекту [3]. Під час проведення ХТО, цей аспект не враховується у моделях ізотермічного дифузійного насичення, що базуються на використанні класичних законів дифузії Фіка [3, 80]. Проте, вклад цих складових може бути досить вагомим. Проте створення рушійної сили може не привести до необхідного результату у зв'язку відсутності врахування впливу на неї дефектів решітки.

Розглянемо, як залежить активація дифузії в удосконаленій моделі формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА від дефектів кристалічної решітки. Враховуючи те, що модель процесу формування зміцнених поверхонь [188] не враховує вплив дефектів решітки, тому для її удосконалення у рівняння дифузії $\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$ вводимо залежність від дефектів решітки. Так, як C – концентрація впроваджених іонів азоту, то безпосередньої залежності від дефектів решітки немає. Проте, якщо

використати D (з рівняння дифузії), то отримаємо вираз:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = (D + \Delta D) \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} = (D + C_D D_D) \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}.$$

Враховуємо, що величина C_D є концентрацією утворених дефектів решітки і змінюється в залежності від впровадження у поверхню іонів азоту та температурного впливу.

Згідно з 1-м законом Фіка [187], за наявності рушійної сили, потік J дифундуючого елементу містить поправку відповідно додаткового імпульсного дрейфового вкладу і має вигляд:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} + C_D \cdot \langle V_x \rangle_F,$$

де $C_D \cdot \langle V \rangle_F$ - дрейфовий вклад (C_D – концентрація дефектів, $\langle V_x \rangle_F$ – дрейфова швидкість, зумовлена імпульсами струму та газотермоциклами).

Тоді, відповідно до другого закону Фіка [187], зміна концентрації дифундуючого азоту у часі буде описуватися наступним рівнянням:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - C_D \langle V_x \rangle_F \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Для дифузії у тверде тіло з джерела з обмеженою кількістю речовини розв'язання даного рівняння матиме вигляд:

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

де L_N – товщина нітридної зони; $C_D \langle V_x \rangle_F \cdot t = x_{ГТЦ}$ – зміна глибини проникнення дифузанта, що залежить від дефектів кристалічної решітки та параметрів ІВГТЦПА, і яку можна розрахувати за формулою:

$$x_{\text{ІВГТЦПА}} = x - \sqrt{\left(\ln \left[\frac{C_{\text{grain}} \cdot L_N}{2\sqrt{\pi Dt}} \right] - \ln C_x \right) \cdot 4Dt}.$$

Таким чином, за умов застосування ІВГТЦПА для зміцнення поверхні суттєво з врахуванням дефектів кристалічної решітки значно посилюється дифузійна рухливість іонів азоту.

Таким чином, 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.

3.4. Визначення закономірностей впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу на властивості зміцненого поверхневого шару конструктивних елементів бурильної колони.

3.4.1. Результати дослідження мікротвердості та товщини зміцненого поверхневого шару. При дослідженні мікротвердості зміцнених ІВГТЦПА поверхневих шарів виявили зростання її значень до 10750 МПа на поверхні (табл. 3.6.) та поступове зменшення до 3500 МПа мікротвердості основи до глибини 300 мкм.

Крім цього, встановлено, що попередня термічна обробка сталевих зразків сприяє збільшенню мікротвердості та глибини зміцненого поверхневого шару. У будь-якому випадку такі значення мікротвердості є у 2,4...2,8 рази більшими, ніж у просто термооброблених (гартування при 870...890°C у оліві, відпускання при 510...570°C) сталевих зразків та у 1,3 рази більшими, ніж у зразків після іонно-плазмового азотування (75%Ar +25%N₂, T=773°K; t=240 хв.) [198].

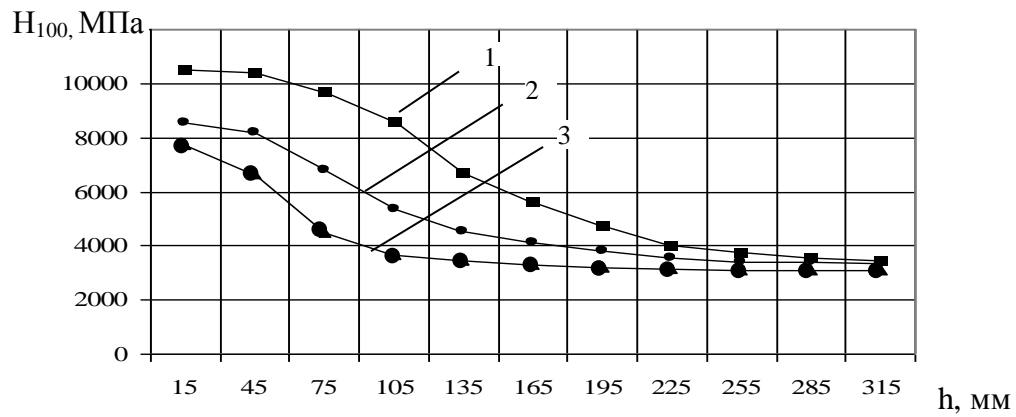
Таблиця 3.5 – Результати дослідження мікротвердості

№ режиму обробки	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	
	без попередньої термообробки	з попередньою термообробкою
0	-	3500
1	8968	9977
2	8100	9870
3	7350	8090
4	8550	10505
5	7983	8185
6	8025	8900
7	8090	9015
8	7470	8860
9	9047	10150
10	9840	8059
11	6976	8250
12	9834	10750
13	7886	8756
14	7997	9065
15	7705	8574
16	7115	8578

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок про вплив параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА на мікротвердість зміцненого поверхневого шару. Таким чином, максимальні значення мікротвердості досягає при температурі в робочій камері від 530 °С до 570 °С та при тиску реакційного газу від 190 до 220 Па. Встановлено, що зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару навпаки зменшується.

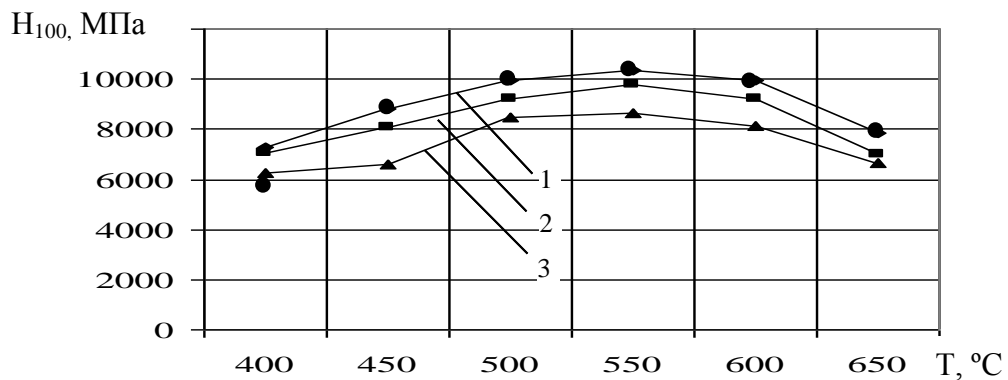
Визначено вплив складу реакційного газу на значення мікротвердості, а саме: за умови використання суміші 60%Ar+40%N₂ мікротвердість набуває максимальних значень, а мінімальних – за суміші 90%Ar+10%N₂.

Характер впливу технологічних параметрів ІВГТЦПА на значення мікротвердості поверхні зміцнених зразків наведено на рис. 3.8...3.11.



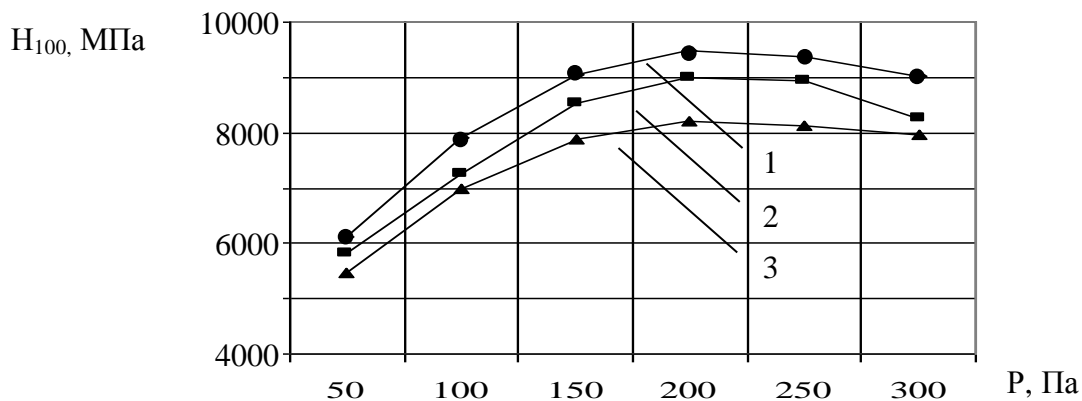
1 – ТО + ІВГТЦПА (75%Ar +25%N₂, T=773°K; P=170 Па; t=140 хв.); 2 – ІВГТЦПА (75%Ar +25%N₂, T=773°K; P=170 Па; t=140 хв.); 3 – газове азотування (75%Ar +25%N₂, T=773°K; t=240 хв.).

Рисунок 3.8 – Значення мікротвердості у залежності від товщини зміцненого шару



1 – 60%Ar+40%N₂. (P = 180 Па; t = 120 хв.); 2 – 90%Ar+10%N₂; (P = 140 Па; t = 70 хв.); 3 – 75%Ar+25%N₂; (P = 150 Па; t = 100 хв.).

Рисунок 3.9 – Значення мікротвердості у залежності від температури технологічного процесу



1 – t = 120 хв.; 2 – t = 190 хв.; 3 – t = 220 хв.

Рис. 3.10. Значення мікротвердості у залежності від тиску реакційного газу (T = 873°K; 60%Ar+40%N₂)

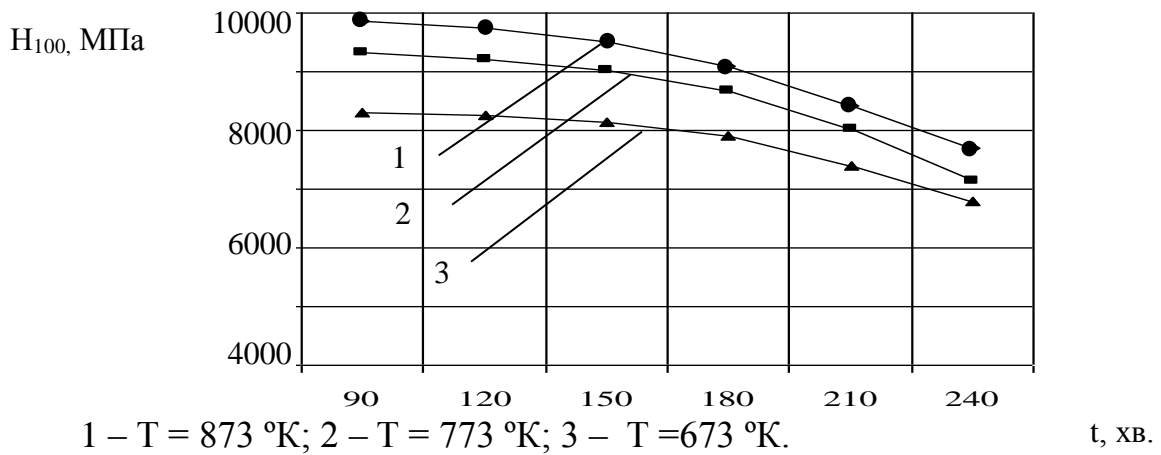


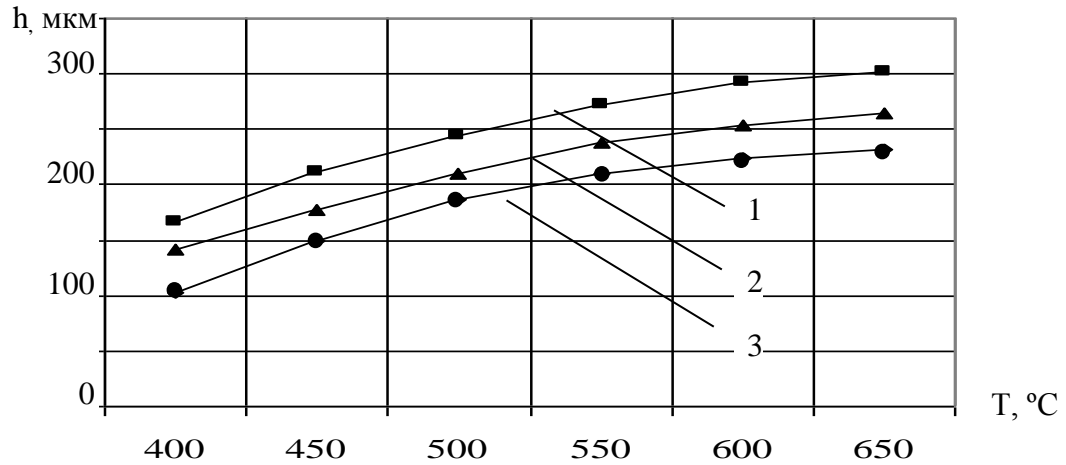
Рисунок 3.11 – Значення мікротвердості у залежності від часу технологічного процесу дифузійного насичення ($P = 200$ Па; $90\%Ar+10\%N_2$)

Також, за умов зміни параметрів ІВГТЦПА товщина зміцненого дифузійного шару (див. табл. 3.7) зразків складала від 100 до 300 мкм. Збільшення часу процесу дифузійного насичення суттєвого збільшення товщини зміцненого шару не дає, так після 220 хв. азотування в $60\%Ar+40\%N_2$ при температурі $873^{\circ}K$ складала лише 35 мкм.

Таблиця 3.6 – Результати дослідження товщини зміцненого дифузійного шару азотованих зразків

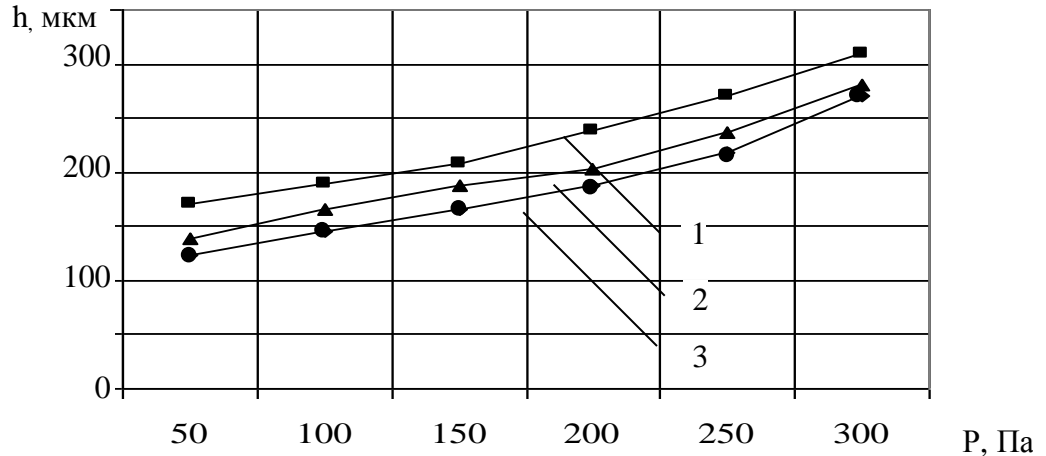
№ режиму обробки	Товщина дифузійного шару, мкм	
	без попередньої термообробки	з попередньою термообробкою
1	260	290
2	90	120
3	230	280
4	195	225
5	100	135
6	180	250
7	170	200
8	185	260
9	110	180
10	115	170
11	220	305
12	135	220
13	225	260
14	170	210
15	150	180
16	160	210

Результати експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів ІВГТЦПА на глибину проникнення дифундуючого елементу, а саме - азоту представлено на рис. 3.12 - 3.14.



1 - $P = 220$ Па; 2 - $P = 180$ Па; 3 - $P = 130$ Па.

Рисунок 3.12 – Значення товщини дифузійного шару у залежності від температури азотування (60%Ar+40%N₂)



1 - $t = 220$ хв.; 2 - $t = 190$ хв.; 3 - $t = 90$ хв.

Рисунок 3.13 – Значення товщини дифузійного шару у залежності від тиску реакційного газу (60%Ar+40%N₂)

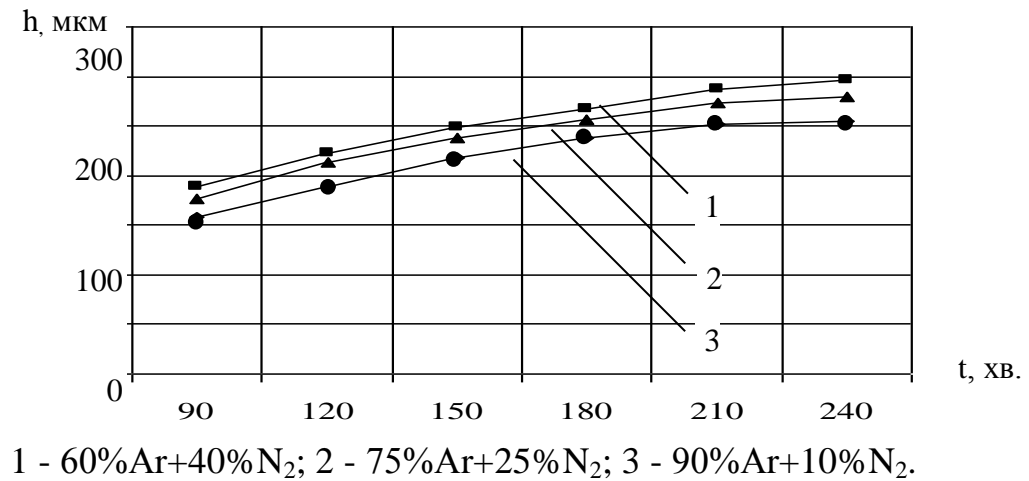


Рисунок 3.14 – Значення товщини дифузійного шару у залежності від часу насичення

Таким чином, в результаті аналізу експериментальних досліджень встановлено, що товщина зміцненого дифузійного шару зростає зі збільшенням температури азотування. Це пояснює удосконалена модель процесу формування зміцнених поверхонь замкових різьбових з'єднань бурильної колони (п.п. 3.3), а саме підвищенні значення енергії іонів азоту та коефіцієнту дифузії. Також, встановлено вплив на збільшення товщини дифузійного шару часу насичення та тиску реакційного газу, причому своїх максимальних значень вона досягає при складі робочого складу 75%Ar+25%N₂. Крім цього, в результаті проведених досліджень встановлено, що процес азотування необхідно проводити тривалістю у 220 хв.. Подальше збільшення часу є не ефективним, так як насичення азотом поверхневого шару зразків зі сталі 40ХН призупиняється.

3.4.2. Визначення механізму зміцнення поверхневого шару. В результаті проведення експериментальних досліджень, а саме хімічного складу зміцнених ІВГТЦПА сталевих зразків та структури поверхневого шару встановлено механізм зміцнення.

Теоретичне положення процесу азотування до теперішнього часу

характеризується двома підходами. Перший сформований як вченими школи Лахтіним Ю. М., так і дослідниками німецької школи [188, 189]. Другий принцип сформований Б. Н. Арзамасовим з співробітниками [190].

Обидві моделі основані на русі позитивних іонів від анода до катоду.

Оскільки досліджувана сталь утримує в невеликій кількості різні нітридоутворюючі елементи (C, Ni, Cr), можна припустити, що нітридна фаза має складний склад. Нітридні частинки утворюють скупчення у вигляді об'ємних і округлих утворень розміром від 2 до 4 мкм. Наряду з хаотично розкиданими частинками, існують направлені ланцюжки нітридів витягнутої форми, розмір яких змінюється в діапазоні від 50 до 220 мкм.

Як показали рентгенографічні і хімічні аналізи карбонітрид може бути описаний формулою $Cr_2C_{0,6}N_{0,3}$ – трьохкомпонентне з'єднання типу твердого розчину з широкою областю гомогенності.

Зменшення мікротвердості азотованих при - 520°С зразків, чим при більш низьких температурах, обумовлено розпадом ϵ – фази, яка має більш високу твердість, ніж твердий розчин N в Fe.

Проведені дослідження процесів азотування (ВПА). Експерименти в залежності від температури показали слідує результати. За рахунок розпаду ϵ – фази, яка характеризується більш високими механічними властивостями, чим твердий розчин азоту залізі, мікротвердість поверхневих шарів знизилася. Порівняльний аналіз дозволив заключити, що зміщення дифузійних максимумів (110) α Fe в область малих кутів відображення (θ) {це неминуче} свідчить про утворення твердого розчину азоту в залізі і утворенням слідів ϵ – фази.

Тенденція посилюється з підвищенням температури азотування. Для зразків, азотованих в інтервалі температур 450...500°С на глибині проникнення рентгенівських променів, утворюється шар ϵ – фази. При більш високих температурах азотування, нітридні фази на поверхні не створюються в помітній кількості, і збільшення мікротвердості обумовлено головним чином утворенням твердого розчину азоту в залізі.

Пошаровий рентгенівський аналіз дає типову картину зміни механізму фазового складу по глибині. В при поверхневій зоні на глибині проникнення рентгенівських променів (- 3 мкм) існує азотований шар, який складається з ε – (Fe_{2-3}N) і γ – (Fe_4N) – фаз (табл.. 3.9.).

Таблиця 3.7 – Результати рентгеноструктурних досліджень зміцнених ІВГТЦПА зразків із попередньою термообробкою

№ режиму обробки	Період ґратки a, нм	Фази поверхневого шару	% фази, мас.
1	2	3	4
1	2,8774	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	37
		γ' – фаза (Fe_4N)	11
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	52
2	2,8732	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	38
		γ' –фаза (Fe_4N)	12
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	54
3	2,8725	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	32
		γ' – фаза (Fe_4N)	25
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	50
4	2,8720	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	30
		γ' – фаза (Fe_4N)	17
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	53
5	2,8730	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	24
		γ' – фаза (Fe_4N)	10
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	48
6	2,8785	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	28
		γ' – фаза (Fe_4N)	22
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	50
7	2,8777	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	30
		γ' – фаза (Fe_4N)	17
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	53

Продовження таблиці 3.7

1	2	3	4
8	2,8793	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	42
		γ' – фаза (Fe_4N)	10
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	48
9	2,8743	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	38
		γ' – фаза (Fe_4N)	10
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	44
10	2,8752	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	18
		γ' – фаза (Fe_4N)	12
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	68
11	2,8748	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	24
		γ' – фаза (Fe_4N)	21
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$),	51
12	2,8786	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	32
		γ' – фаза (Fe_4N)	14
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	52
13	2,8767	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	28
		γ' – фаза (Fe_4N)	21
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	51
14	2,8748	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	22
		γ' – фаза (Fe_4N)	10
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$),	66
15	2,8729	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	20
		γ' – фаза (Fe_4N)	8
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	70
16	2,8744	ε -фаза (Fe_{2-3}N)	34
		γ' – фаза (Fe_4N)	14
		α -твердий розчин ($\alpha\text{-FeN}$)	58

По мірі зрівнювання шарів залишаються нижні нітриди і тверді розчини з різною концентрацією азоту. Дифракційний максимум (110) зміщується в бік великих кутів відображення (20) і приближається до значення, відповідному

вихідному стану на глибині – 60 мкм.

Тимчасова залежність зміни глибини шару при тиску і підвищених температурах знаходяться особливості динаміки цього процесу. Які полягають в тому, що за перші 10 – 20 хв. досягається максимальне значення мікротвердості (\square 12 Г Па) на глибині до 20 – 25 мкм з поступовим їхнім збільшенням до вихідної величини на глибині – 75 мкм. В подальшому зі збільшенням часу до 300 хв. Просування фронту насичення азотом (збільшення мікротвердості) в глибину сповільнюється. При цьому значення мікротвердості – 11,0 Г Па в інтервалі глибини 10 – 45 мкм відповідає твердому розчину.

Факт азотування в даних умовах заперечує механізм утворення нітридів в газовому середовищі, так як поверхня, бомбардування електронами, не розпиляється. Збіг даних по азотуванню свідчить про відсутність помітного вкладу молекулярних і атомних іонів в процесі азотування. Тому логічно припустити, що нейтральні атоми мають високу активність при насиченні поверхні.

Основним компонентом процесу являються іони азоту N_2^+ , нейтральні атоми азоту N і збуджені молекули азоту в різних метастабільних станах. Збуджені молекули азоту при зіткненні з поверхнею зразка втрачають енергію активності і по суті в процесі азотування не приймають участі. Іони молекулярного азоту N_2^+ мають значну кінетичну енергію, яка набута в результаті прискорення в електричному полі и приймають участь в нагріві підложки і розпиленні її поверхні, збільшуючи шорсткість.

Для того, щоби перехід молекул азоту був енергетично вигідний в дисоціативний хемосорбований стан, необхідно забезпечити виконання стану:

$$Q = 1/2 E_d,$$

де Q – теплота хемосорбції; E_d – енергія дисоціації.

Енергія дисоціації N_2 на два атоми азоту $E_d = 941,6$ кДж/моль, теплота

хемосорбції азоту на залізі $Q = 293$ кДж/моль. Ця величина менше половини необхідної енергії дисоціації. Тому пряма реакція переходу молекул азоту після фізичної адсорбції з послідуною дисоціацією на атоми, які потім хімосорбуються, неможлива.

Особливості стану газу в між електродному просторі в тому, що в діапазоні тисків $0,01 - 1$ Па концентрація молекул азоту і молекул іонів N_2^+ близькі по величині. При цьому концентрація атомарного азоту на порядок нижче, але її достатньо для забезпечення процесу азотування.

З'єднання Fe-N мають малу термодинамічну міцність. Так, енергія утворення молекул Fe_2N $G_f = 21$ кДж/моль, температура розпаду - 500 °С; для порівняння у молекули C_rN відповідно $G_f = 94,3$ кДж/моль, температура розпаду - 1600 °С. Тому під час бомбардування пришвидшеними частинками одночасно з утворенням з'єднань Fe-N відбувається їх дисоціація, і таким чином підсилюється генерація атомарного азоту. На поверхні зразка утворюється шар нітридів заліза, співвідношення ϵ і γ – фаз залежить від парціального тиску азоту, температури підложки і інтенсивності бомбардування (густини і енергії потоку частинок). Зі збільшенням температури підложки процес дисоціації з'єднань Fe-N підсилюється, зростає частка γ' – фази, яка як і ϵ – фаза, зникає по мірі подальшого підвищення температури.

Слідє відмітити, що іони молекулярного азоту N_2^+ мають значну кінетичну енергію, яку отримали в результаті пришвидшення в електричному полі розрядного проміжку. В плазмі вакуумного розряду при тиску процесу концентрація атомарного азоту перевищує 10^{10} см⁻³. Частина потоку нейтральних атомів азоту після зіткнення з поверхнею переходить в хемосорбований стан. При цьому вони можуть дефундувати в об'єм виробу або мігрувати по поверхні.

Таким чином, відповідно пропонуемій моделі для азотування у вакуумі достатньо в плазмовому об'ємі присутність атомарного азоту в необхідній концентрації і необхідній температурі зразка. Бомбардування іонами або

електронами слугує тільки зручним інструментом для забезпечення необхідної температури виробу.

Іншими словами, запропоновано новий механізм азотування сталей, у відповідності з яким даний процес залежить тільки від концентрації атомарного азоту і температури підложки, тобто азотування має місце при бомбардуванні як іонами, так і електронами. При цьому відмічено, що швидкість азотування однакова в обох випадках. Азотовані шари мають меншу кількість нітридів заліза, а присутній в основному твердий розчин азоту.

3.4.3. Результати дослідження залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі. В результаті проведених досліджень залишкових напружень в зміцненому поверхневому шарі отримані криві залежностей, які наведені на рис. 3.16 та 3.17 [195]. 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.

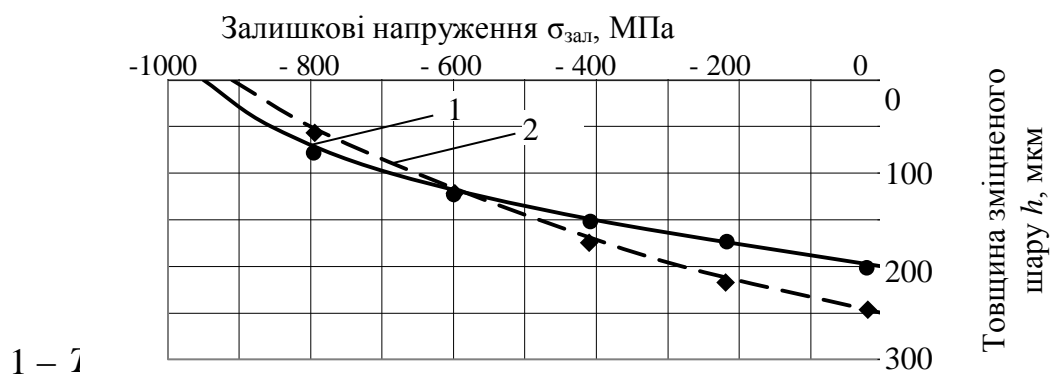


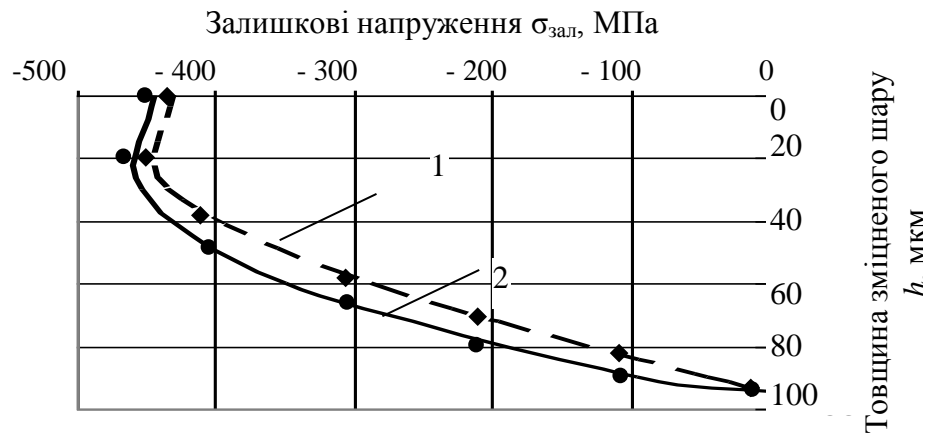
Рисунок 3.15 – Значення залишкових напружень по товщині зміцненого шару зразків зі сталі 40ХН після ІВГТЦПА з попередньою ТО (60%Ar+40%N₂; P = 130 Па; t = 190 хв.)



1 – $T = 673^{\circ}\text{K}$; 2 – $T = 873^{\circ}\text{K}$.

Рисунок 3.16 – Значення залишкових напружень по товщині зміцненого шару зразків зі сталі 40ХН після ІВГТЦПА без попередньої ТО ($60\%\text{Ar}+40\%\text{N}_2$; $P = 130 \text{ Па}$; $t = 190 \text{ хв.}$)

Криві значень залишкових напружень у поверхневих шарах по глибині після ІВГТЦПА (рис. 3.18) вказують на їх зменшення.



1 – $T = 673^{\circ}\text{K}$; 2 – $T = 873^{\circ}\text{K}$.

Рисунок 3.17 – Значення залишкових напружень по товщині зміцненого шару зразків зі сталі 40ХН після ІВГТЦПА ($60\%\text{Ar}+40\%\text{N}_2$; $P = 130 \text{ Па}$; $t = 190 \text{ хв.}$)

Таким чином, в результаті дослідження встановлено, що значні значення залишкових напружень можуть перевищити границю міцності матеріалу на стиск і призвести до його руйнування, а малі значення залишкових напружень стиску не можуть компенсувати напруження розтягу

в матеріалі, які призводять до зниження його механічних властивостей.

Висновки до розділу 3.

1. З аналізу літературних джерел, використання методів експертних оцінок та результатів серії відсіюючих експериментів визначено критерії оптимізації та конструкційні, технологічні та експлуатаційні фактори для математичного моделювання технологічного процесу ІВГТЦПА. Керованим факторам встановлено рівні варіювання.

2. Удосконалено діючий комплекс технологічного забезпечення процесу зміцнення поверхневих шарів ЗРЗ БК ІВГТЦПА на основі автоматизованої системи контролю та управління технологічним процесом.

3. В результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА на механічні властивості у зміцнених шарах сталі 40ХН.

4. За результатами експериментальних досліджень визначено, що:

- для отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 180...220 Па, час дифузійного насичення – 100...160 хв.; температура процесу – 773...873°К;

- для отримання максимальної товщини дифузійного шару тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 180...220 Па, час дифузійного насичення – 120...200 хв.; температура процесу – 773...873°К.

- у зміцнених поверхневих шарах виникають залишкові напруження стиску порядку 480...1000 МПа, рівень і розподіл яких залежать від технологічних параметрів процесу ІВГТЦПА та від попередньої термообробки.

5. Для отримання оптимальних параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА необхідно провести експериментальні дослідження на зносостійкість, корозійну стійкість та випробування на втому.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

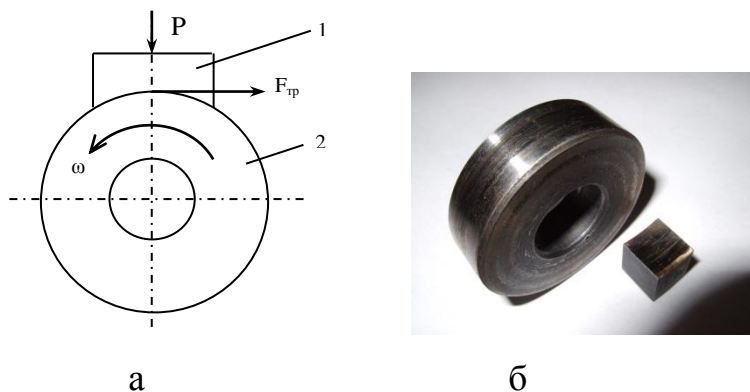
Одним із шляхів підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин є зменшення кількості відмов колон бурильних труб, на ліквідацію яких витрачаються значні кошти. Однією з основних причин виходу бурильних колон з ладу в процесі експлуатації є зниження механічних властивостей конструкційних елементів. У зв'язку з цим зростає актуальність проблеми підвищення механічних властивостей зовнішньої поверхні сталевих елементів бурильних колон як визначального фактора їх працездатності.

Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК є використання методу ІВГТЦПА. Проте вплив параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА на зносо- та корозійну стійкість, границю витривалості досліджені не в повній мірі.

Завдяки цьому в 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 зразків у залежності від часу випробувань, границі витривалості при симетричному циклі. Отримані залежності, перевірені на адекватність, відтворюваність і 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.

4.1 Триботехнічні випробування зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони.

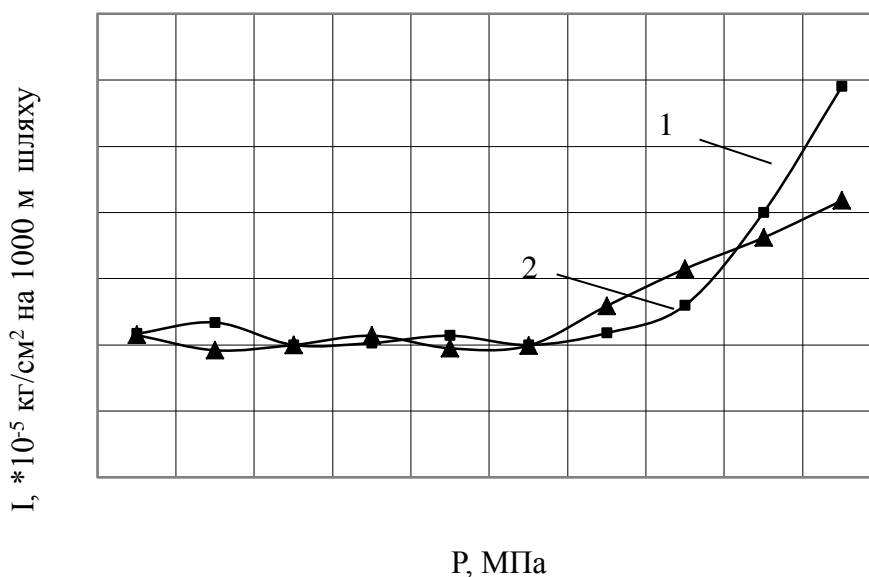
4.1.1. Результати триботехнічних досліджень. Триботехнічні характеристики зміцнених ІВГТЦПА поверхневих шарів визначали на машині тертя за таких умов: мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-201; питоме навантаження – 2,5...25 МПа; швидкість ковзання – 0,4; 1,0 м/с. Шорсткість поверхонь зразків відповідала $R_a = 0,3...0,4$ мкм, а роликів-контртіл зі сталі 40ХН – $R_a = 0,5$ мкм. Контакт пари тертя відбувався за схемою “диск-колодка” (рис. 1). Для цього робочі поверхні зразків виконувалися у формі угнутого циліндра діаметром 40 мм. Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів у вказаних умовах заміряли коефіцієнт тертя та розраховували вагову інтенсивність зношування I у $\text{кг}/\text{см}^2$ на 1000 м шляху тертя [205].



а) схема контакту пари тертя “диск-колодка” 1 – зразок; 2 – ролик-контртіло; б) загальний вигляд зміцненого зразка та ролика-контртіла.

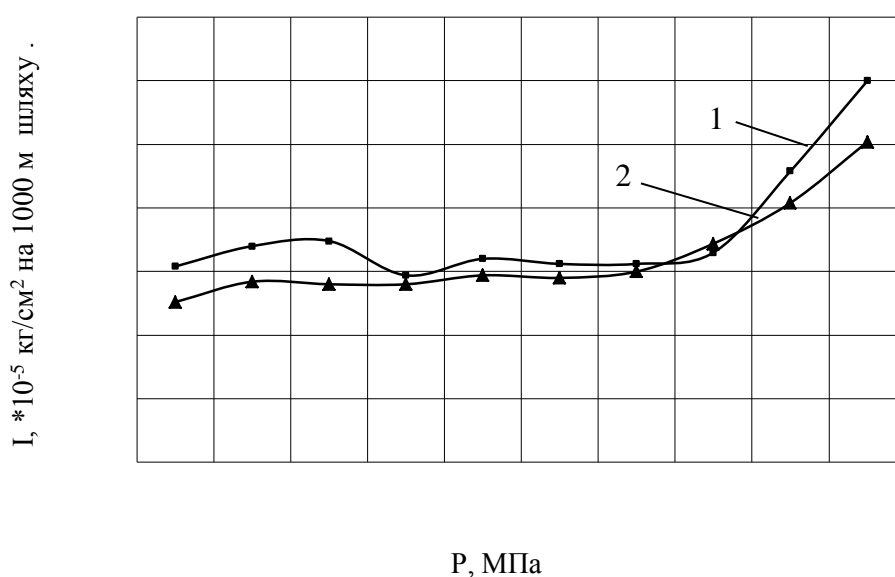
Рисунок 4.1 – Пара тертя “диск-колодка”

В результаті проведення експериментальних досліджень поверхневих шарів зразків зі сталі 40ХН згідно з планом експерименту встановлено (рис. 4.2 – 4.18) [205], що значення інтенсивності зношування залежно від режимів технологічного процесу ІВГТЦПА зростають у 1,8...2,2 разу порівняно з інтенсивністю зношування термооброблених зразків (табл. 4.1.).



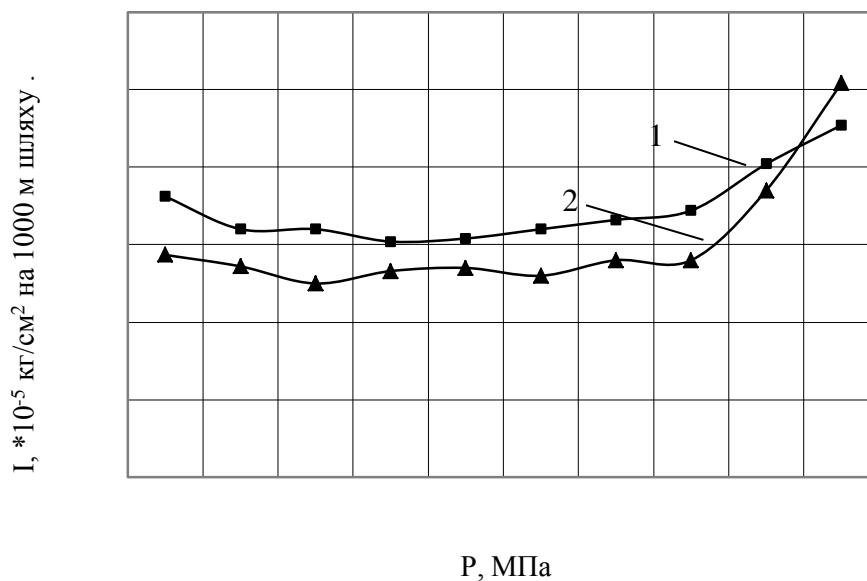
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.2 - Залежність інтенсивності зношування термообробленого (ТО) зразка (гартування при 870...890°C у оливі, відпускання при 510...570°C) від питомого навантаження P



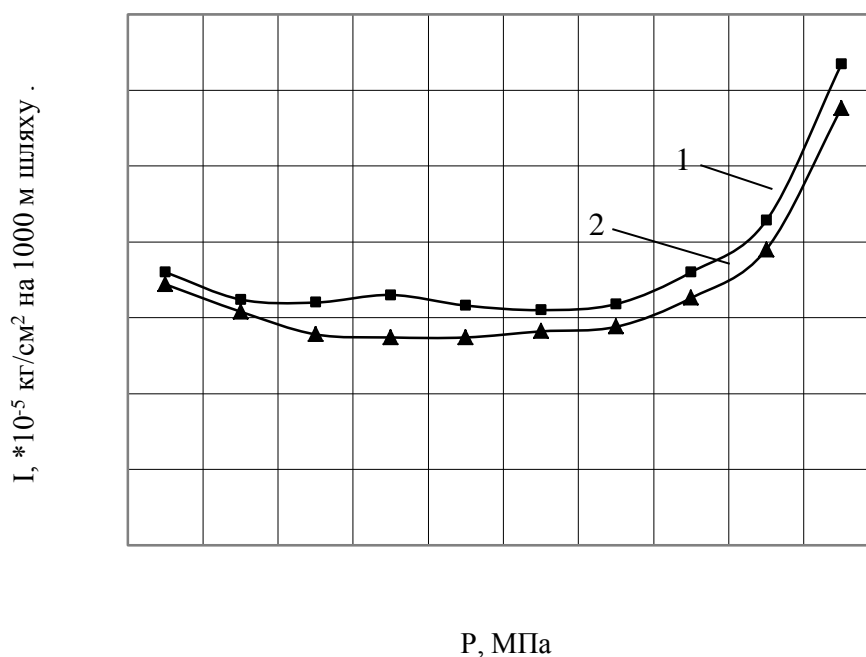
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.3 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3$ год; $P = 125$ Па; 75% Ar + 25% N₂; $T = 500^\circ\text{C}$; $\Delta T = 75^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



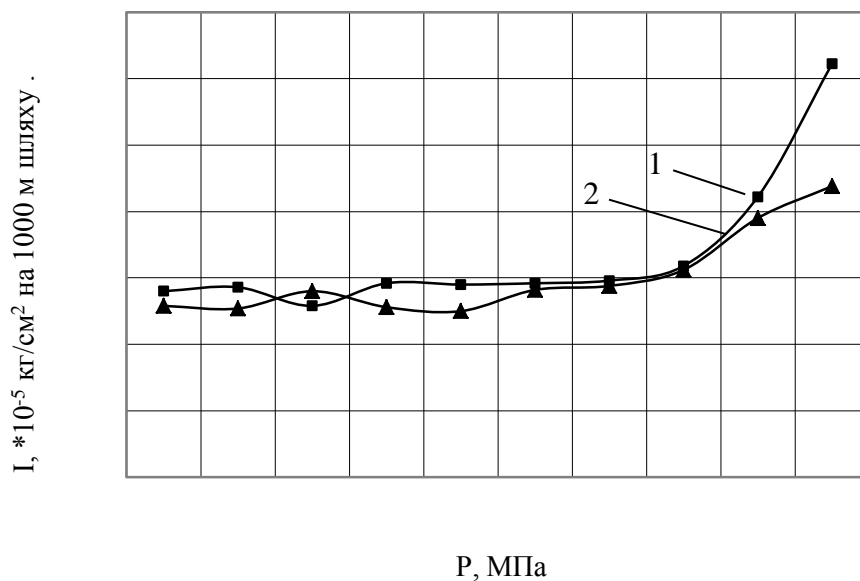
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.4 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 2,5$ год; $P = 200$ Па; $60\% \text{Ar} + 40\% \text{N}_2$; $T = 600^\circ\text{C}$; $\Delta T = 50^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



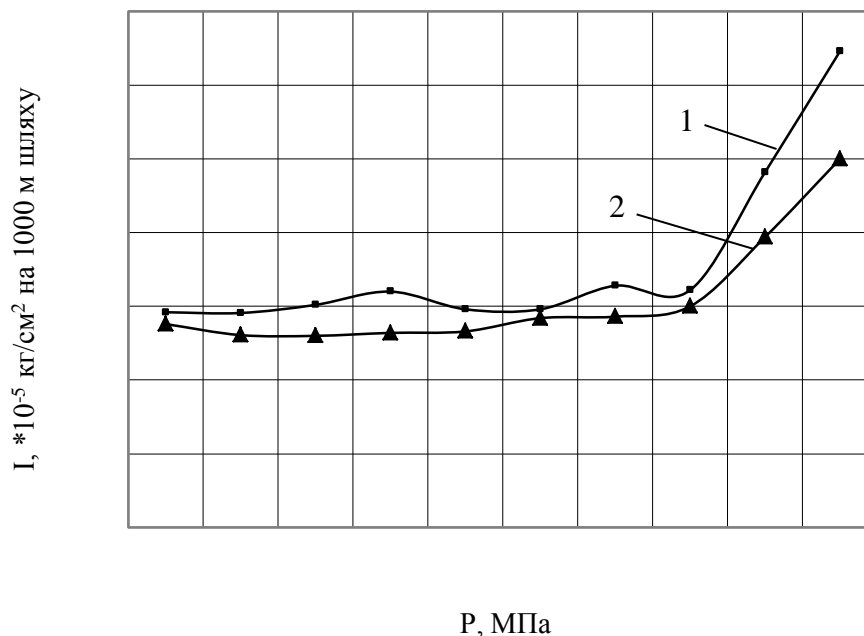
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.5 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3,5$ год; $P = 75$ Па; $90\% \text{Ar} + 10\% \text{N}_2$; $T = 400^\circ\text{C}$; $\Delta T = 100^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



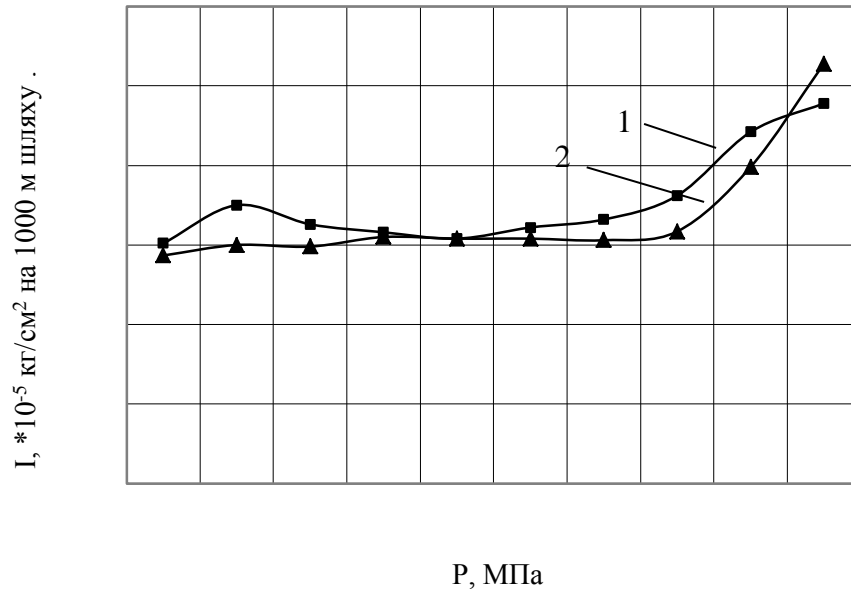
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.6 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 2,5$ год; $P = 175$ Па; $90\%Ar + 10\%N_2$; $T = 600^\circ C$; $\Delta T = 75^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



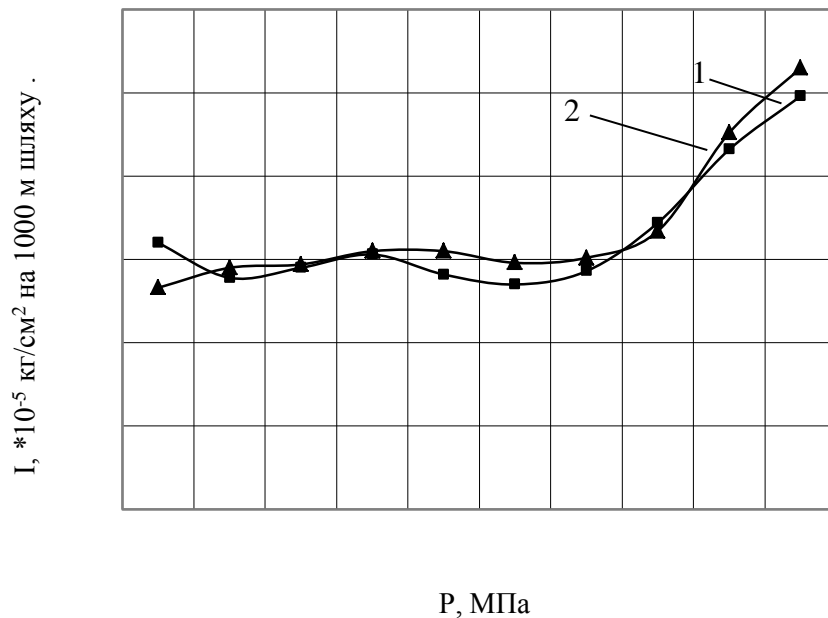
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.7 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3,5$ год; $P = 50$ Па; $75\%Ar + 25\%N_2$; $T = 500^\circ C$; $\Delta T = 50^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



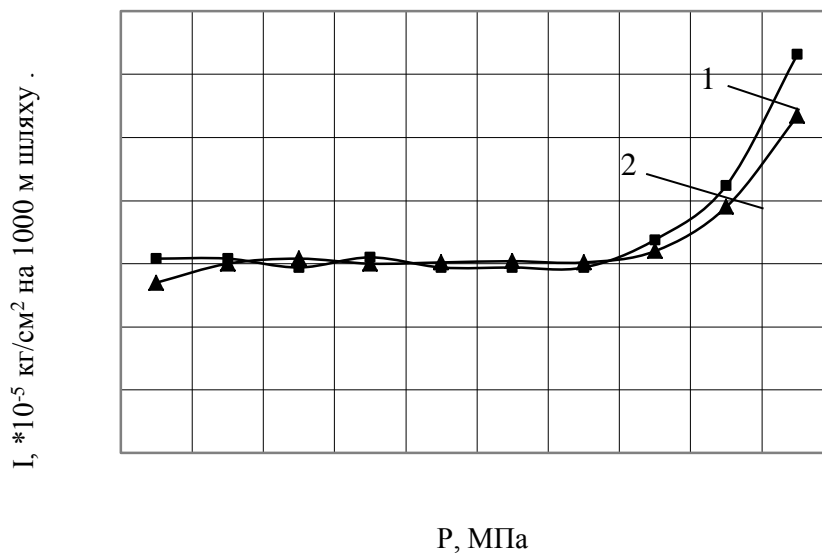
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.8 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3$ год; $P = 100$ Па; 75% Ar + 25% N₂; $T = 400^\circ\text{C}$; $\Delta T = 125^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



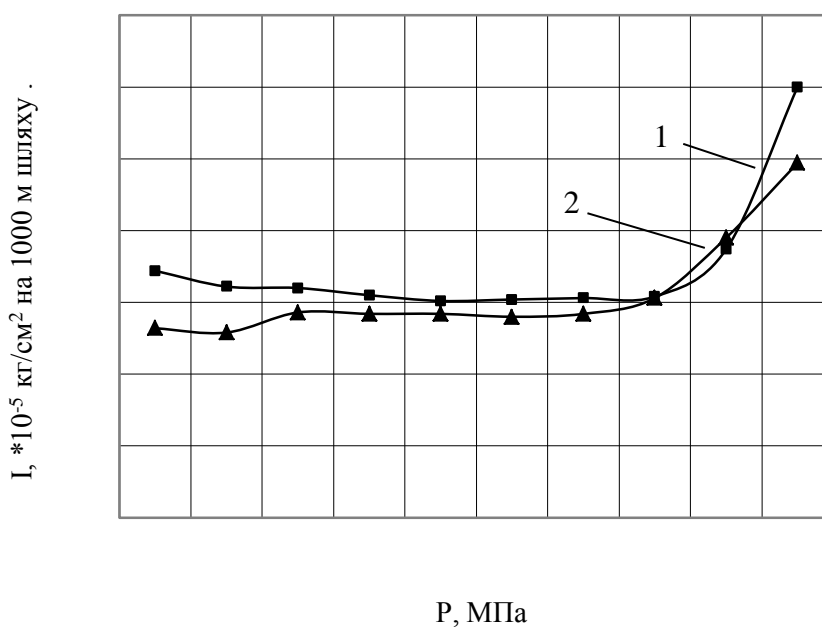
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.9 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 4$ год; $P = 225$ Па; 60% Ar + 40% N₂; $T = 500^\circ\text{C}$; $\Delta T = 50^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



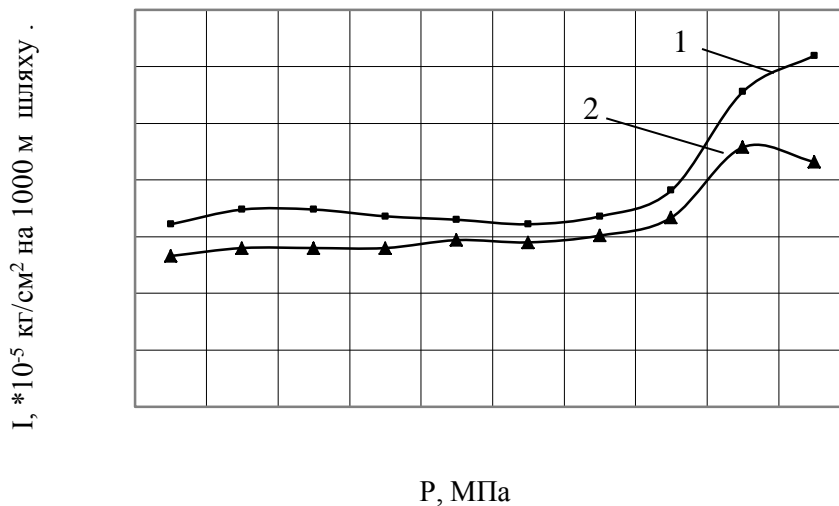
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.10 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 1,5$ год; $P = 250$ Па; $90\%Ar + 10\%N_2$; $T = 400^\circ C$; $\Delta T = 25^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



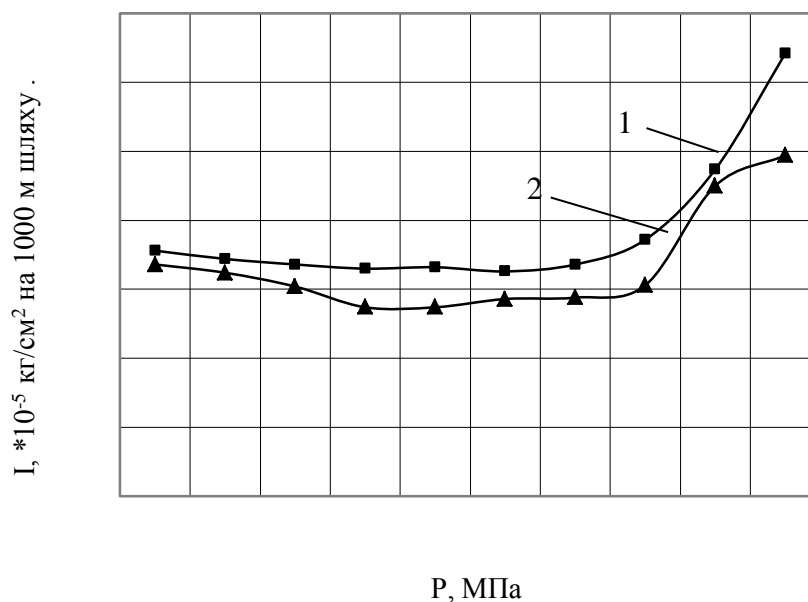
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.11. Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 1,5$ год; $P = 250$ Па; $60\%Ar + 40\%N_2$; $T = 400^\circ C$; $\Delta T = 25^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



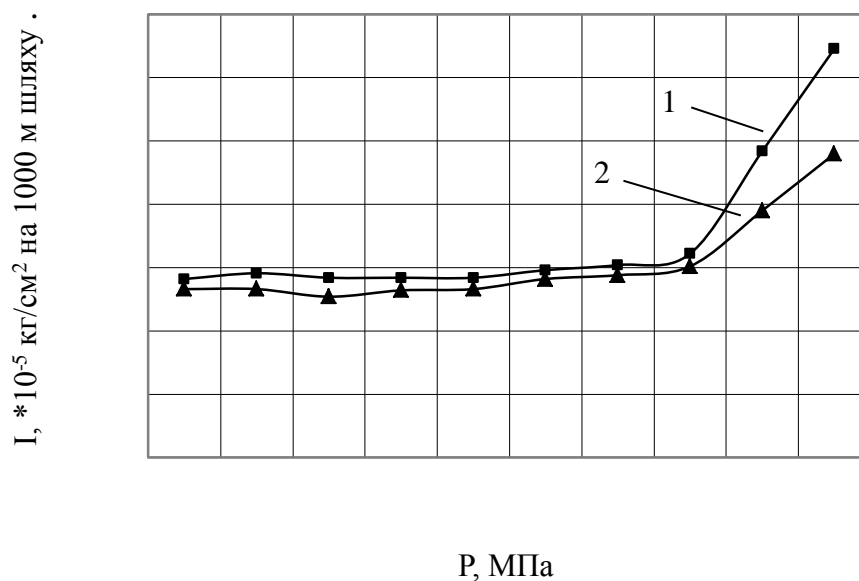
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.12. Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 2,5$ год; $P = 50$ Па; $90\%Ar + 10\%N_2$; $T = 500^\circ C$; $\Delta T = 75^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



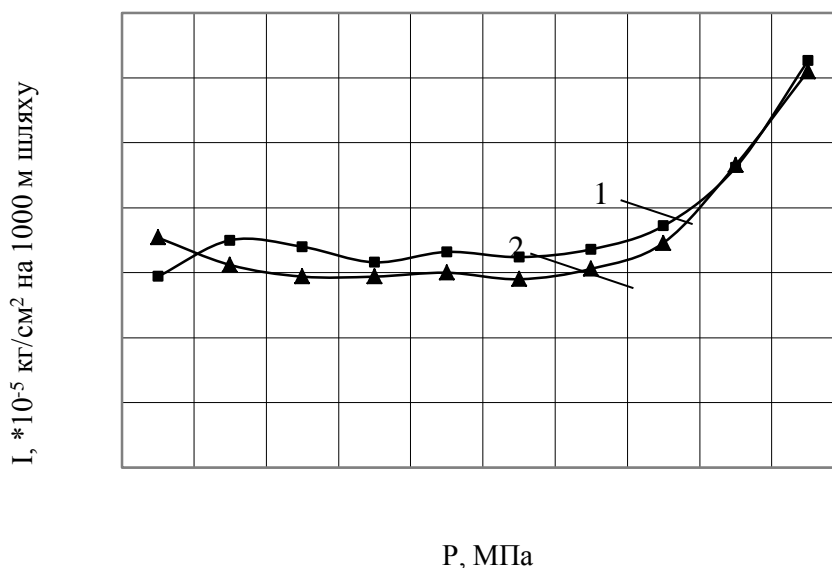
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.13 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3,5$ год; $P = 175$ Па; $75\%Ar + 25\% N_2$; $T = 400^\circ C$; $\Delta T = 125^\circ C$) зразка від питомого навантаження P



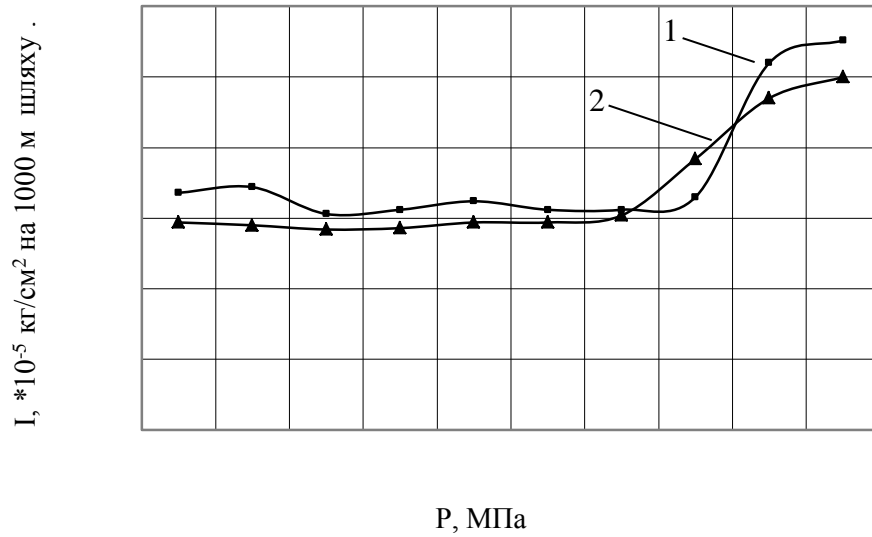
1 – $V = 0,4 \text{ м/с}$; 2 – $V = 1,0 \text{ м/с}$.

Рисунок 4.14 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 2,5 \text{ год}$; $P = 100 \text{ Па}$; $60\% \text{ Ar} + 40\% \text{ N}_2$; $T = 600^\circ\text{C}$; $\Delta T = 75^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



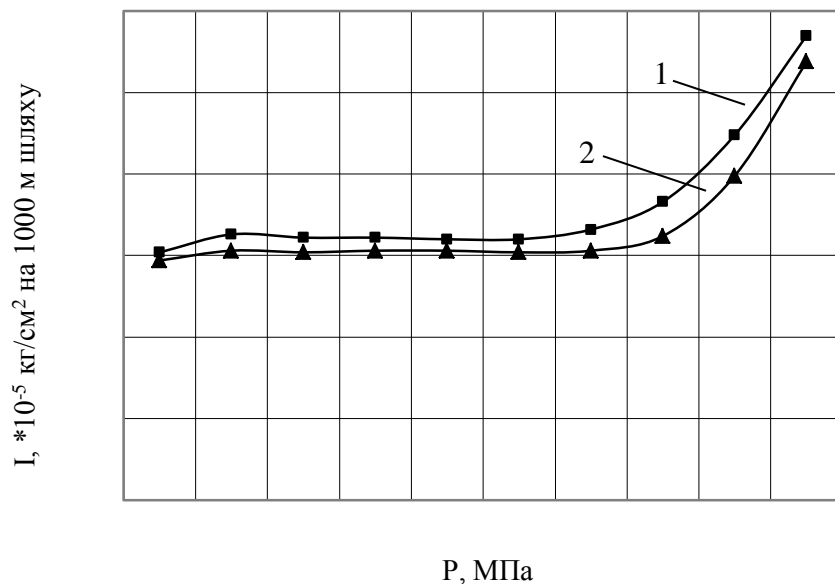
1 – $V = 0,4 \text{ м/с}$; 2 – $V = 1,0 \text{ м/с}$.

Рисунок 4.15 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3,5 \text{ год}$; $P = 225 \text{ Па}$; $90\% \text{ Ar} + 10\% \text{ N}_2$; $T = 400^\circ\text{C}$; $\Delta T = 25^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



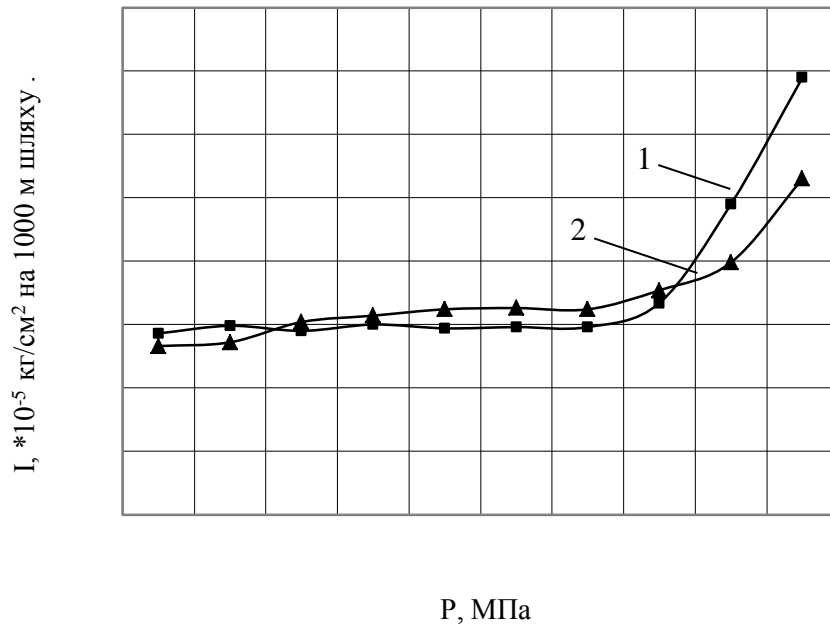
1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.16 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 3$ год; $P = 150$ Па; 60% Ar + 40% N_2 ; $T = 500^\circ\text{C}$; $\Delta T = 100^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.17 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 4$ год; $P = 25$ Па; 75% Ar + 25% N_2 ; $T = 600^\circ\text{C}$; $\Delta T = 50^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P



1 – $V = 0,4$ м/с; 2 – $V = 1,0$ м/с.

Рисунок 4.18 – Залежність інтенсивності зношування попередньо ТО та зміцненого ІВГТЦПА ($t = 1,5$ год; $P = 150$ Па; $75\% \text{ Ar} + 25\% \text{ N}_2$; $T = 400^\circ\text{C}$; $\Delta T = 75^\circ\text{C}$) зразка від питомого навантаження P

4.1.2. Побудова математичних моделей за результатами триботехнічних досліджень. За результатами експерименту (згідно алгоритму та методиці, що представлена в п. 3.1) проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, який характеризує інтенсивність зношування зміцненого поверхневого шару від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів (табл. 4.1) [201, 205]. Розрахунок моделей здійснювався за допомогою ППП ПРІАМ. В якості початкових даних використовувалися матриця планування експерименту (табл. 3.4) та результати експериментальних досліджень, що проведені двічі при одних і тих же умовах (табл. 4.1).

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

Таблиця 4.1 – Результати триботехнічних випробувань

№ режиму обробки	Інтенсивність зношування, $I \cdot 10^{-5}$ кг·см ⁻² 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

$$Y_1 = 1,61058 + 0,494431x_1^2x_6^2 - 0,376419x_4^2x_6^3 - 0,273589x_4^2 - 0,281322x_3^2x_6^2 + 0,124359x_6^2 - 0,141168x_1^2x_5^2, \quad (4.1)$$

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

Формули переходу від кодованих значень факторів (табл. 3.2) до натуральних:

$$x_1 = 0,0142815(X_1 - 160,604); \quad (4.2)$$

$$x_1^2 = 1,64458(X_1^2 - 0,0191164X_1 - 0,372824); \quad (4.3)$$

$$x_1^3 = 3,31219(X_1^3 - 0,0582365X_1^2 - 0,654433 X_1 + 0,0145849); \quad (4.4)$$

$$x_2 = 0,0100246(X_2 - 136,182); \quad (4.5)$$

$$x_2^2 = 1,56832(X_2^2 - 0,0387083X_2 - 0,34791); \quad (4.6)$$

$$x_2^3 = 3,195(X_2^3 - 0,0147624X_2^2 - 0,663917 X_2 - 0,08331); \quad (4.7)$$

$$x_3 = 1(X_3 - 1); \quad (4.8)$$

$$x_3^2 = 1,6(X_3^2 - 0,625); \quad (4.9)$$

$$x_4 = 0,00941176(X_4 - 766,75); \quad (4.10)$$

$$x_4^2 = 1,64632(X_4^2 - 0,0907563X_4 - 0,605536); \quad (4.11)$$

$$x_5 = 0,0227556(X_5 - 74,8047); \quad (4.12)$$

$$x_5^2 = 1,55962(X_5^2 - 0,0132701X_5 - 0,354272); \quad (4.13)$$

$$x_5^3 = 3,1495(X_5^3 - 0,00418042X_5^2 - 0,675089X_5 - 0,00322023); \quad (4.14)$$

$$x_6 = 0,098507 (X_6 - 13,4424); \quad (4.15)$$

$$x_6^2 = 1,66877 (X_6^2 - 0,0706331X_6 - 0,349593); \quad (4.16)$$

$$x_6^3 = 3,23485 (X_6^3 - 0,0766846X_6^2 - 0,623196X_6 - 0,0021555). \quad (4.17)$$

Отримана залежність, перевірена на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики (див. п. 2.1). Результати статистичного аналізу представлені в таблиці 4.2.

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G – критерієм Кохрена (див. п. 2.1). Для всіх регресійних залежностей $G_{\text{розр}} < G_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Перевірка гіпотези на адекватність отриманої моделі результатів експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера (див. п. 2.1). Для одержання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

Оцінка якості отриманої математичної моделі проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції (див. п. 2.1). Коефіцієнт

множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковими експериментальними результатами.

Таблиця 4.2 – Статистичні характеристики моделі.

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_1
Аналіз адекватності моделі	
Залишкова дисперсія	0,00787
Дисперсія відтворюваності	0,00054
Розрахункове значення F-критерію	1,55
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи.	0,05 $V_1 = 6$ $V_2 = 9$
Табличне значення F-критерію для адекватності	2,53267
Стандартна помилка оцінки.	0,09
Стандартна помилка оцінки, скоректована з урахуванням ступенів свободи	0,11
Модель адекватна	
Аналіз інформативності моделі	
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,96133
Уведено регресорів	7
Коефіцієнт множинної кореляції	0,9805
Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,9706
F відношення для R	37,2914
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 $V_1 = 6$ $V_2 = 25$

Продовження таблиці 4.2

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_1
Табличне значення F-критерію для інформативності	2,49041
Критерії Бокса й Веца для інформативності.	2
Модель інформативна	

В отриманій математичній моделі коефіцієнти множинної кореляції статистично значимі, тобто $F_{\text{розрах}} > F_{\text{табл}}$, при прийнятому рівні значимості. Отже, модель, інформативна і несе корисну інформацію про процес, що моделюється.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує інтенсивність зношування сталі зі зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис.4.19 – 4.21) [201, 205].

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

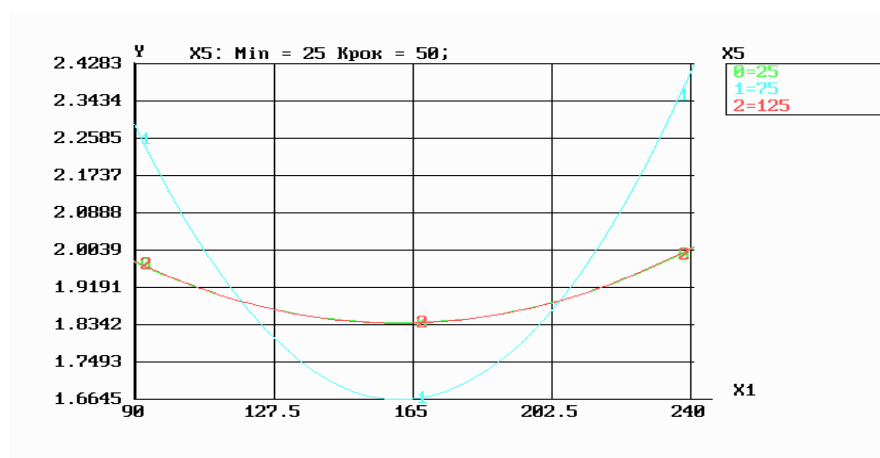


Рисунок 4.19 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_5)$ при $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_4=673$ °K, $X_6=2,5$ МПа

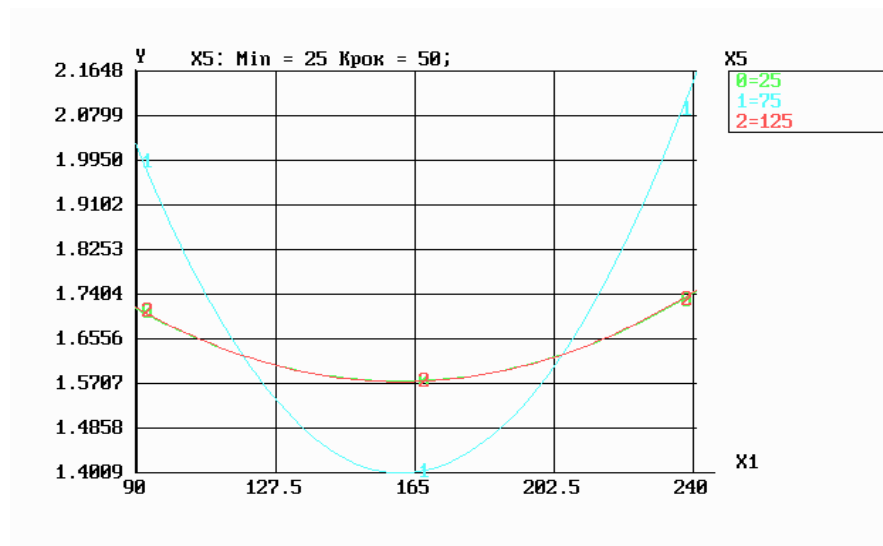


Рисунок 4.20 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_5)$ при $X_3=70\%Ar+25\%N_2$, $X_4=773 \text{ }^0K$, $X_6=13,75 \text{ МПа}$

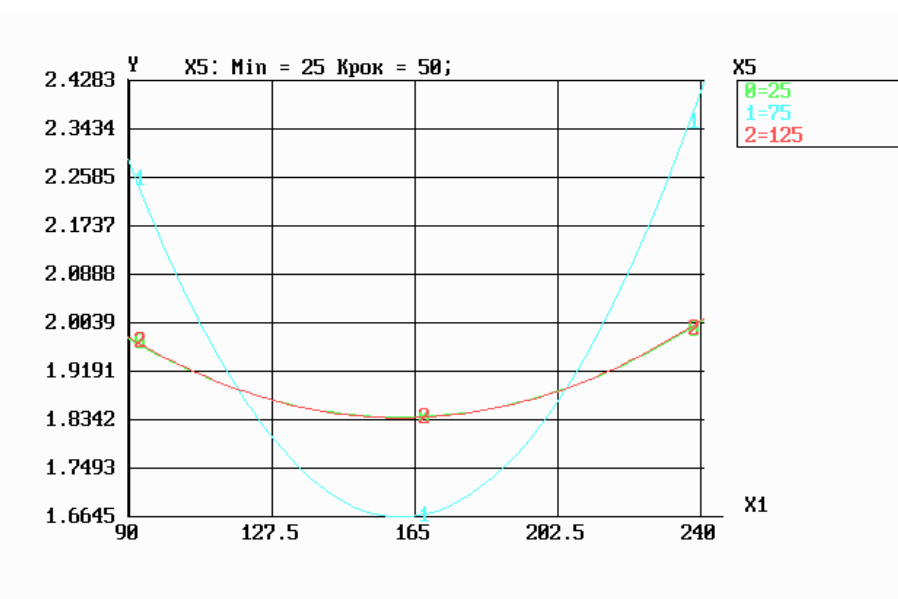


Рисунок 4.21 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_1 = f(X_1, X_5)$ при $X_3=90\%Ar+10\%N_2$, $X_4=773 \text{ }^0K$, $X_6=13,75 \text{ МПа}$

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, які представлено на рис. 4.22, 4.23 та 4.24.

Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійна залежність адекватна та інформативна, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_i статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійна

залежність адекватно описує процес і її можна використовувати для аналізу й оптимізації технологічного процесу формування зміцнених поверхневих шарів ІВГТЦПА.

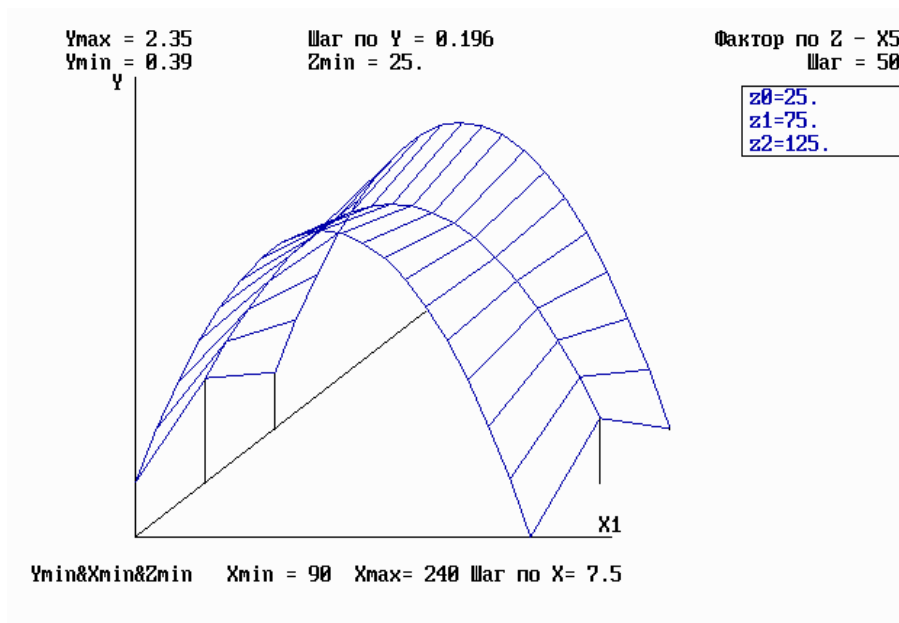


Рисунок 4.22 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_4 = 673 \text{ } ^\circ\text{K}$, $X_6 = 2,5 \text{ МПа}$

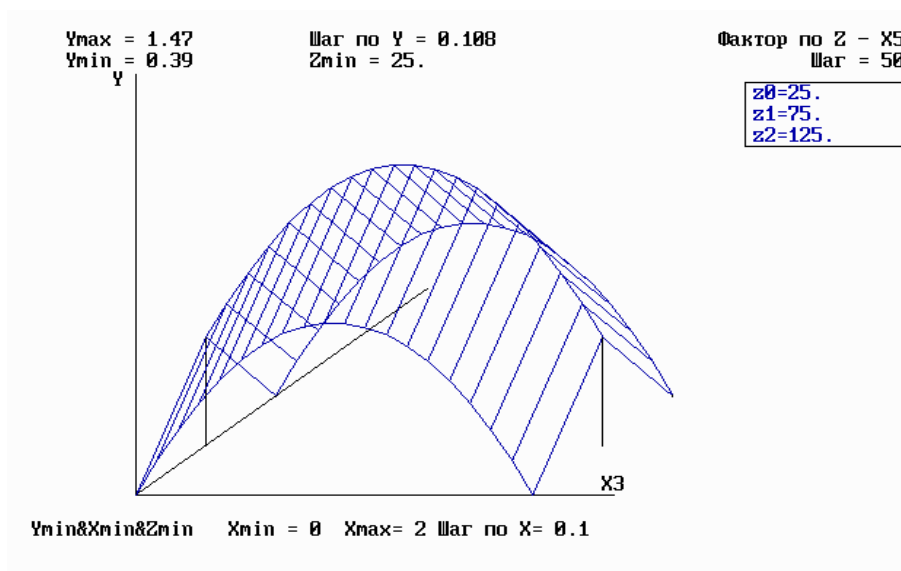


Рисунок 4.23 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_3, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_4 = 673 \text{ } ^\circ\text{K}$, $X_6 = 2,5 \text{ МПа}$

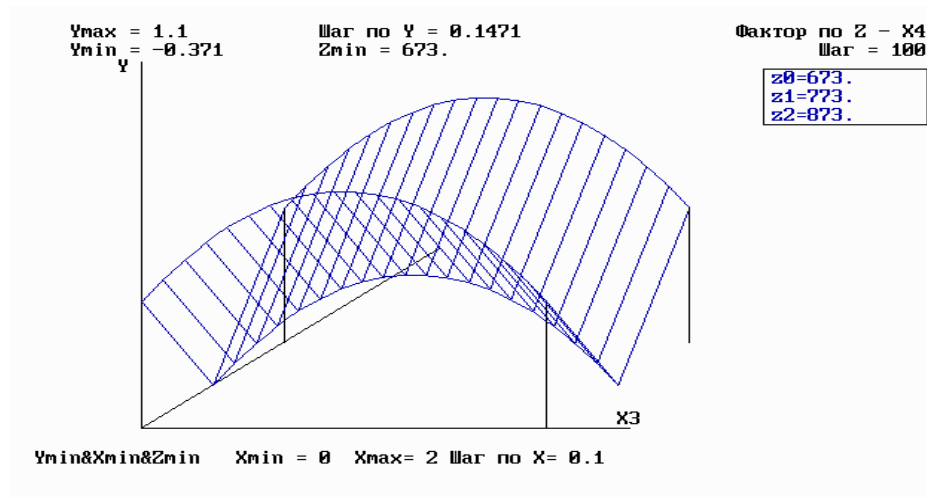


Рисунок 4.24 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_3, X_4)$ в тривимірному просторі при $X_4=673$ °К, $X_6=2,5$ МПа

4.2 Дослідження зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони на корозійну стійкість.

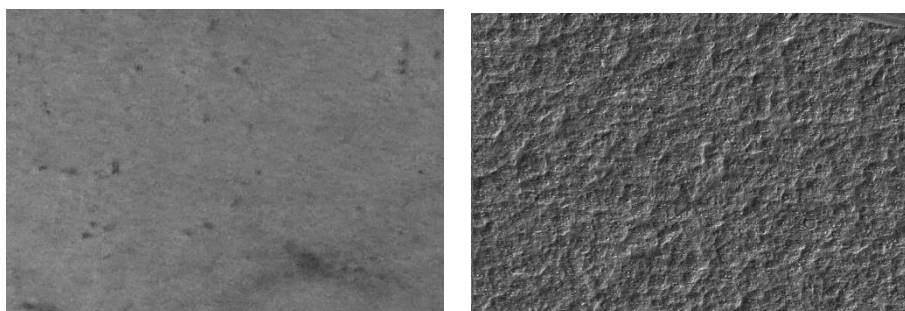
4.2.1. Результати випробувань на корозійну стійкість. В результаті проведення випробувань на корозійну стійкість зразків зі сталі 40ХН встановлено [206] (рис. 4.25), що завдяки впливу параметрів удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА відбувається підвищення корозійної стійкості у 1,5...3 разів (табл. 4.3). Крім цього визначено, що корозійне пошкодження зразків без обробки ІВГТЦПА відбувається на значно більшу глибину, ніж у зміцнених [206, 209].



Рисунок 4.25 – Зразки для випробування на корозійну стійкість

Таблиця 4.3 – 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

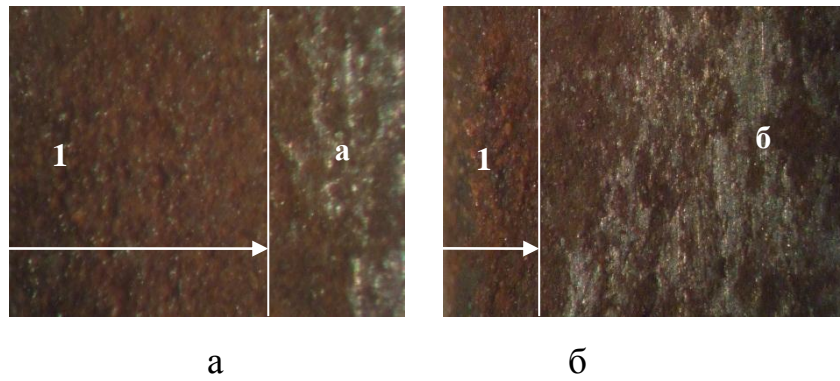


а

б

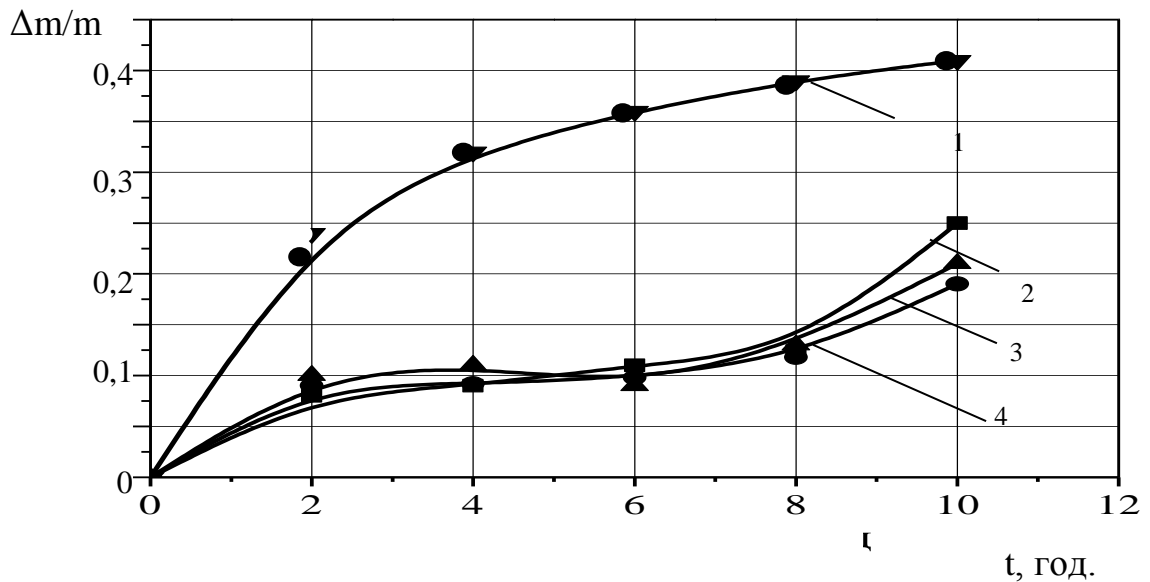
а) до та б) після випробувань, $\times 500$.

Рисунок 4.26 – Зовнішній вигляд поверхні зразка



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

Рисунок 4.27 – 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 4.28 – Зміна значення питомого збільшення маси зразка від часу

4.2.2. Побудова математичних моделей за результатами випробувань на корозійну стійкість. За результатами експерименту (згідно алгоритму та методики, що представлена в п. 2.1) проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, який характеризує корозійну стійкість сталі 40ХН зі зміцненим ІВГТЦПА поверхневим шаром від технологічних та експлуатаційних

факторів (табл. 3.2). Розрахунок моделей здійснювався за допомогою ППП ПРІАМ. В якості початкових даних використовувалися матриця планування (табл. 3.4) та результати експериментальних досліджень (табл. 4.3) [206].

Після обробки результатів експерименту отримана математична модель, що описує залежність питомого збільшення маси зразка від технологічних та експлуатаційних факторів[205].

$$Y_2 = 0,252985 + 0,0232932 x_2^2 - x_4^2 - 0,01990961x_3^2 - 0,02081x_5^2 - 0,0212151x_1x_5 - 0,0921139x_3^2x_4^2x_5^2 - 0,0908706x_1^2x_3x_4, \quad (4.18)$$

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

Формули переходу від кодованих значень до натуральних представлено в п. 4.1.2 (4.2 – 4.17).

Отримана залежність, перевірена на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики (див. п.2.1.). Результати статистичного аналізу представлені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Статистичні характеристики моделей

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_2
Аналіз адекватності моделі	
Залишкова дисперсія	0,00143388
Дисперсія відтворюваності	0,000709375
Розрахункове значення F-критерію для адекватності	2,02133
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи.	0,05 V1 = 6 V2 = 9

Продовження таблиці 4.4

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_2
Табличне значення F-критерію для адекватності	2,53767
Стандартна помилка оцінки.	0,0386477
Стандартна помилка оцінки, скоректована з урахуванням ступенів свободи	0,0473336
Модель адекватна	
Аналіз інформативності моделі	
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,666832
Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_2
Уведено регресорів	7
Коефіцієнт множинної кореляції	0,816598
Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,707282
F відношення для R	3,00223
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 $V_1 = 6$ $V_2 = 25$
Табличне значення F-критерію для інформативності	2,49041
Критерії Бокса й Веца для інформативності.	49
Модель інформативна	

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G – критерієм Кохрена. Для всіх регресійних залежностей $G_{\text{розр}} < G_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Перевірка гіпотези на адекватність отриманої моделі результатів експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера. Для одержання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

Оцінка якості отриманої математичної моделі проводилася шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковими експериментальними результатами.

В отриманій математичній моделі коефіцієнти множинної кореляції статистично значимі, тобто $F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$, при прийнятому рівні значимості. Отже, модель, інформативна і несе корисну інформацію про процес, що моделюється.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує корозійну стійкість сталі 40ХН зі зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 4.29 – 15).

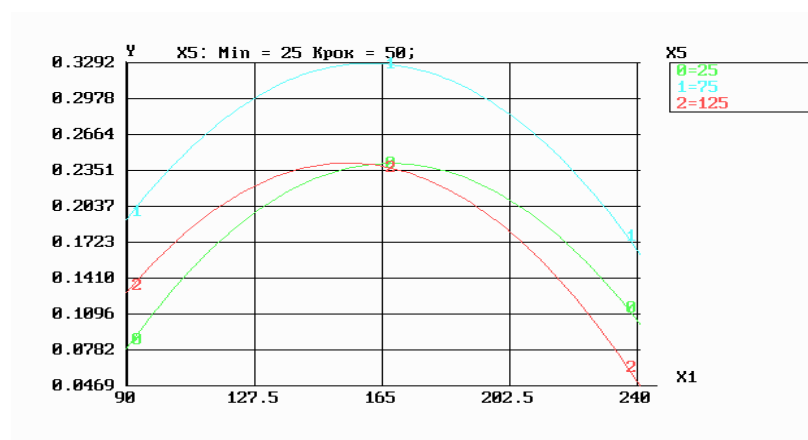


Рисунок 4.29 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=25$ Па, $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_4=673$ °К

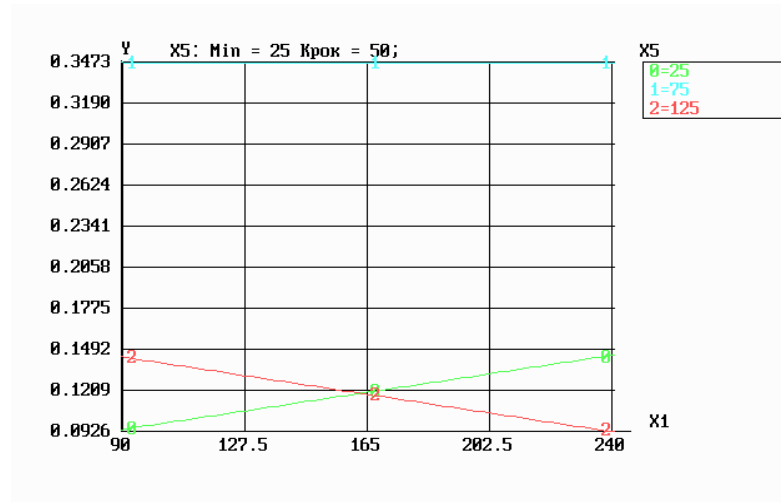


Рисунок 4.30 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=137,5$ Па, $X_3=75\%Ar+25\%N_2$, $X_4=773$ °К

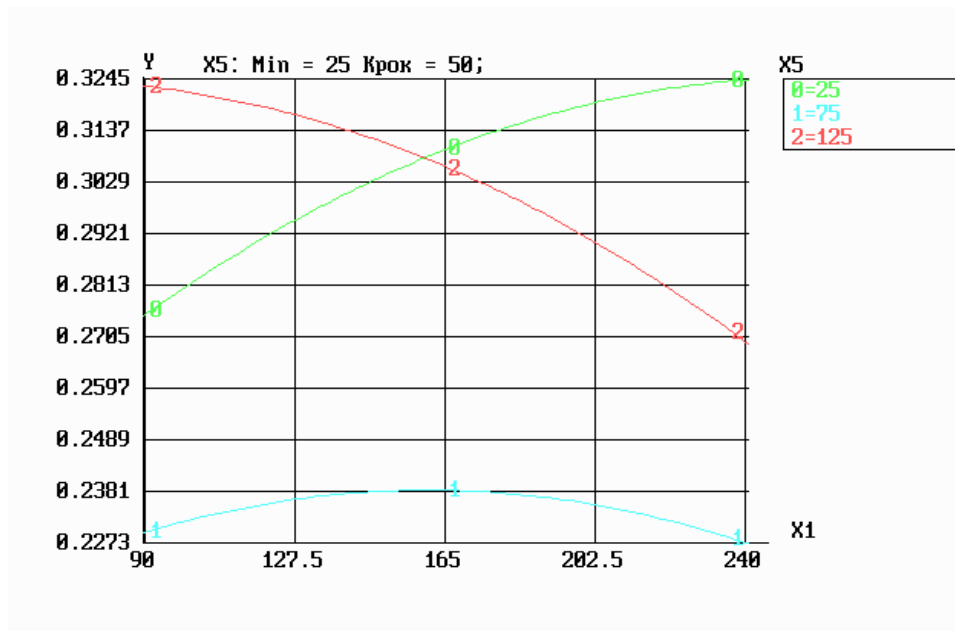


Рисунок 4.31 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_2 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=137,5$ Па, $X_3=90\%Ar+10\%N_2$, $X_4=773$ °К

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, які представлено, як приклад, для корозійної стійкості на рис. 4.31 – 4.32.

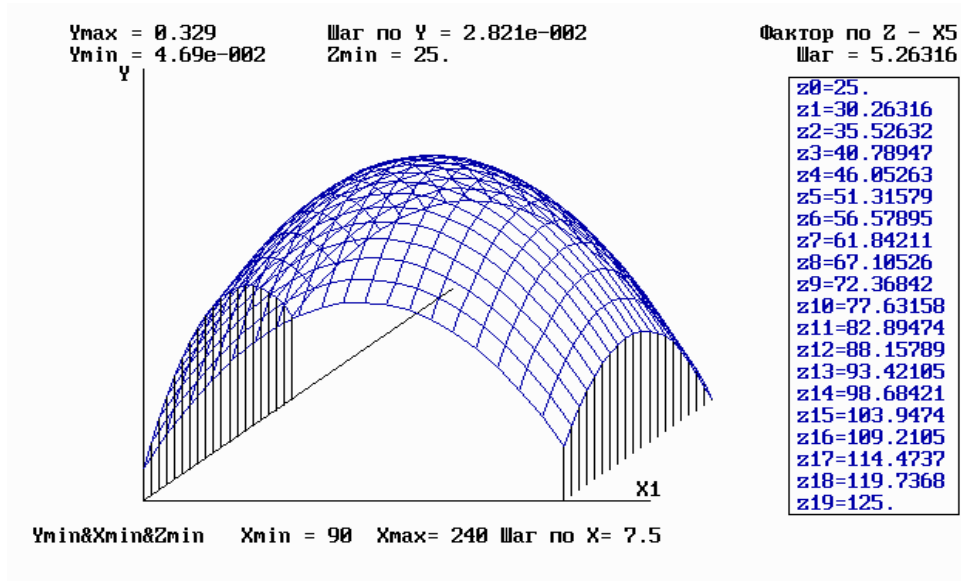


Рисунок 4.32 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_2=25$ Па, $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_4=673$ °K

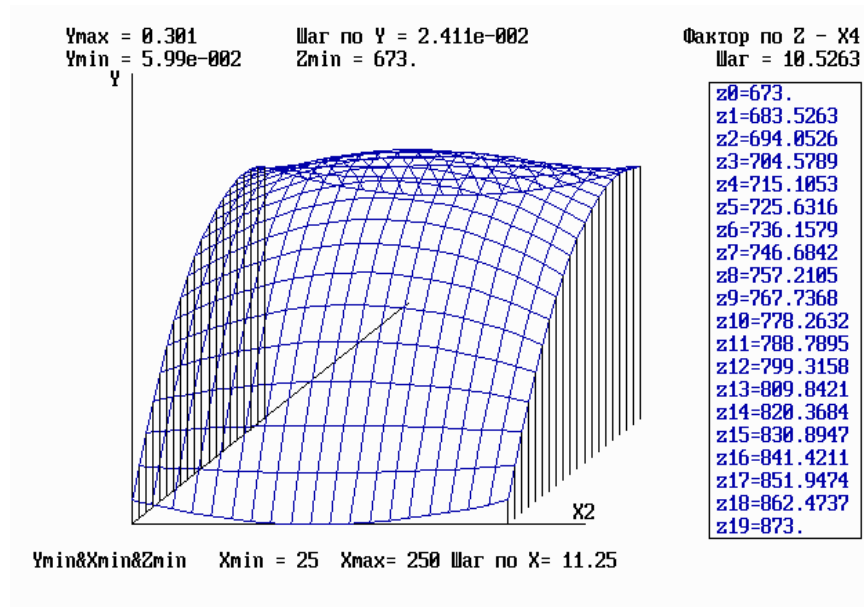


Рисунок 4.33 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_2, X_4)$ в тривимірному просторі при $X_1=90$ хв., $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_5=25$ °K

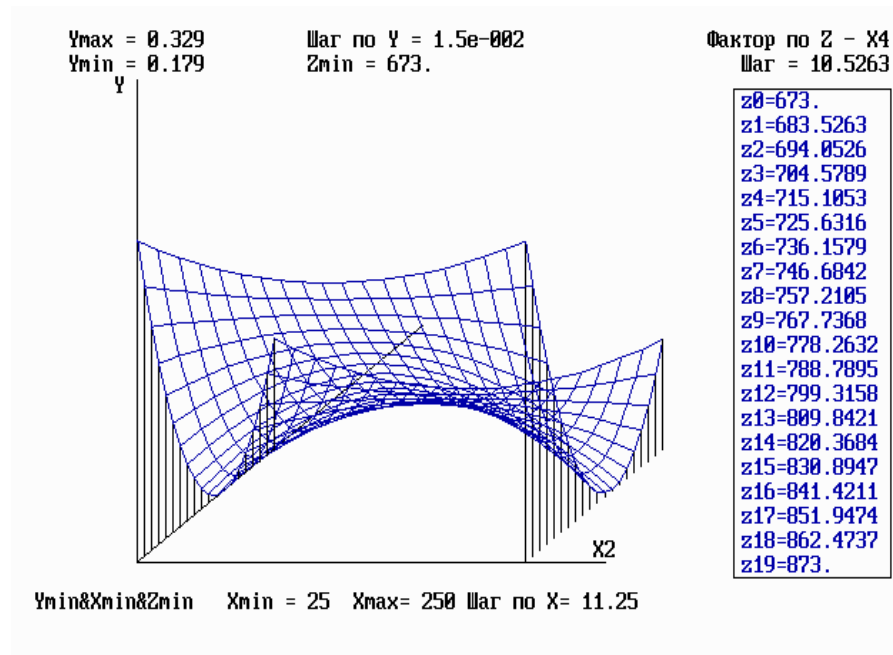


Рисунок 4.34 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_2, X_4)$ в тривимірному просторі при $X_1=165$ хв., $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_5=75$ °К

Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійна залежність адекватна та інформативна, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_1 статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійна залежність адекватно описує процес і її можна використовувати для аналізу й оптимізації технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА.

4.3 Дослідження зміцнених поверхневих шарів конструктивних елементів бурильної колони на втому.

4.3.1. Результати випробувань на втому. Дослідження зразків (рис. 4.34 та рис. 4.35) проводилися на магнітострикційній установці, яка описана у п.п. 2.2.1.

Довжина зразка розраховувалася за формулою [148, 208]:

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

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

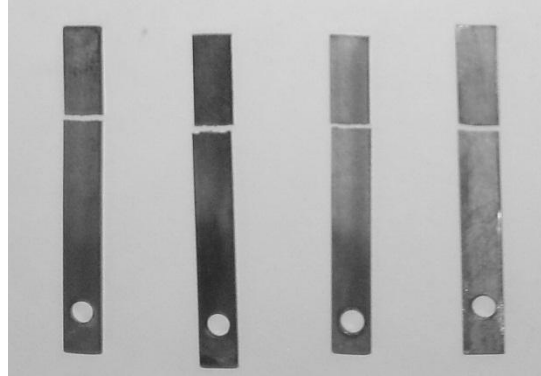


Рисунок 4.35 – Загальний вигляд зразків зі сталі 40ХН після випробувань

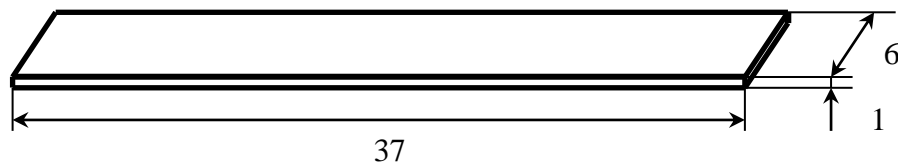


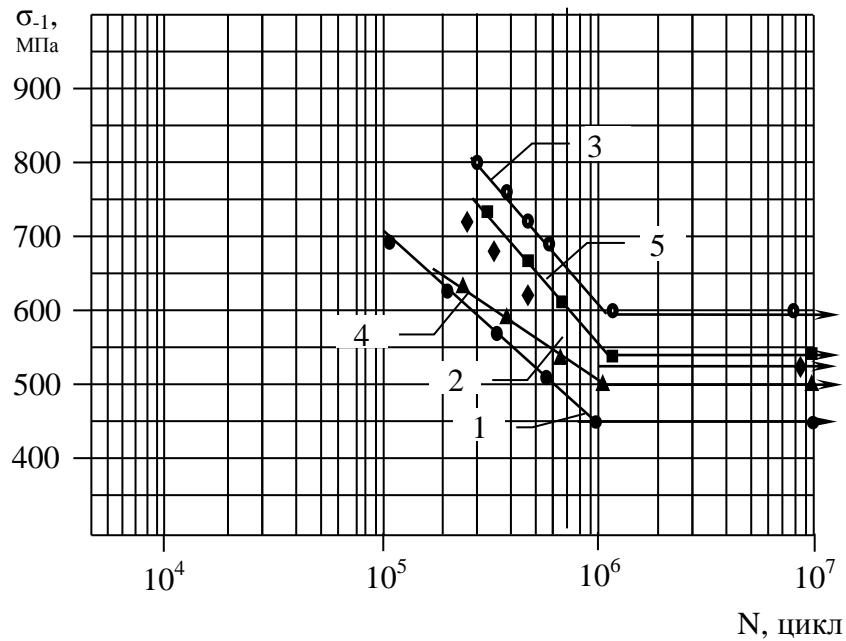
Рисунок 4.36 – Креслення зразка зі сталі 40ХН для високочастотних випробувань на втому [148]

Тому, при проведенні експериментальних досліджень зразки зі сталі 40ХН мали ширину 6 мм, довжину 37 мм та товщину 1 мм.

Згідно методики експериментальних досліджень (див. п.п. 2.5) використовувалася третя форму коливань. База випробувань на втому $N=10^7$ циклів навантаження. Для визначення опору втомі зміцнених ІВГТЦПА сталевих зразків та побудови кривої втоми досліджували не менше 10...15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування, при цьому амплітуду коливання зразка й частоту навантаження на протязі всього часу дослідження майже до його руйнування підтримували постійною. Момент початку руйнування зразка встановлювали за падінням резонансної частоти його коливань на 10...15 Гц.

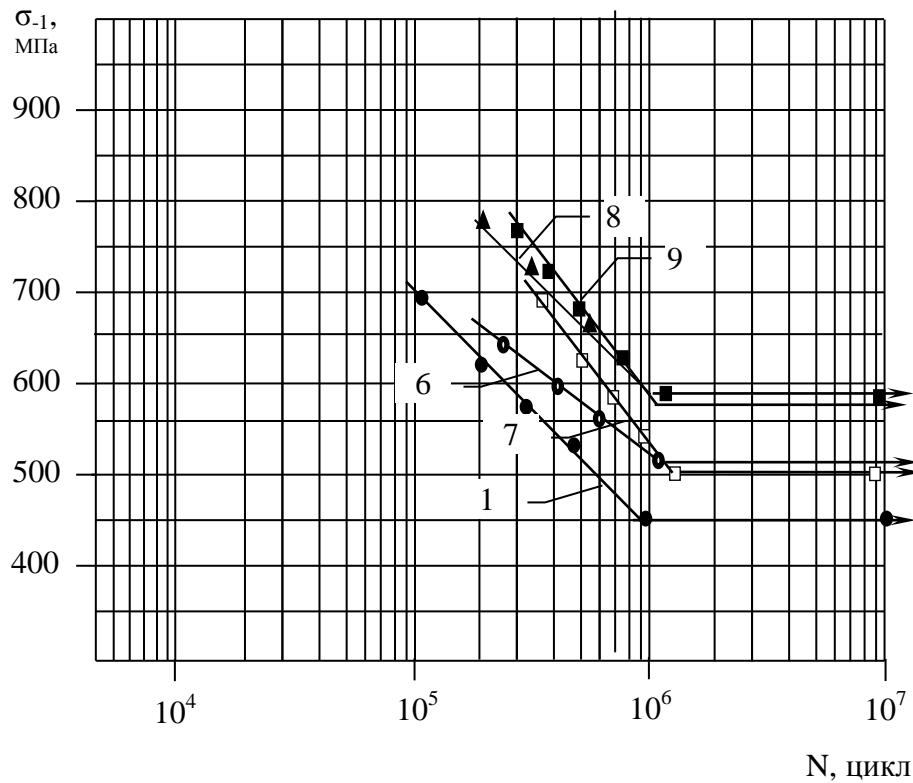
Результати експериментальних досліджень високочастотних випробувань на втому зразків зі сталі 40ХН як без зміцнення так із зміцненим поверхневим шаром представлено на рис. 4.37 ... 4.40 [201, 208, 209]. Усі

параметри технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару (див. табл. 3.4) підвищують σ_{-1} .



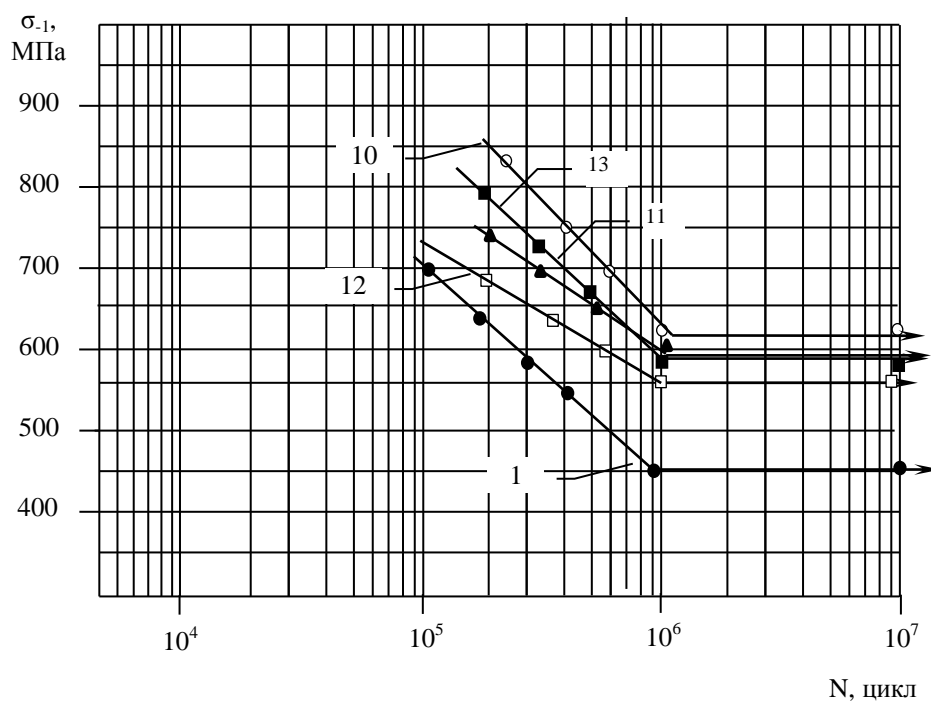
1 – без зміцнення; 2-5 – із зміцненням згідно плану експерименту.

Рисунок 4.37 – Криві втоми сталі 40ХН



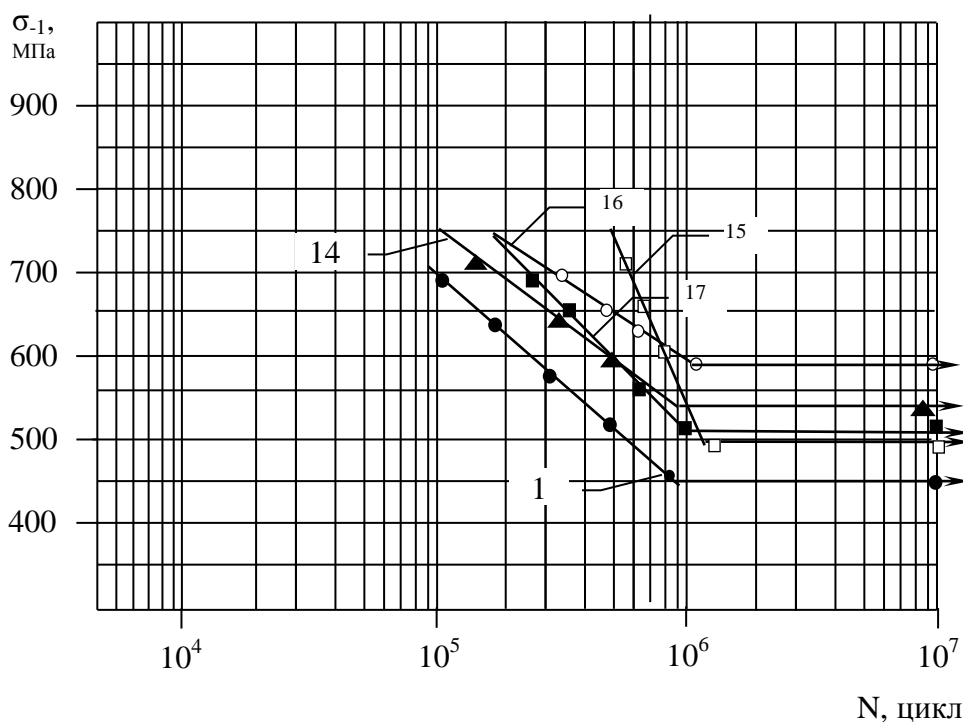
1 – без зміцнення; 6-9 – із зміцненням згідно плану експерименту.

Рисунок 4.38 – Криві втоми сталі 40ХН



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

Рисунок 4.39. Криві втоми сталі 40ХН



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

Рисунок 4.40. Криві втоми сталі 40ХН

Підсумовуючи слід сказати, 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.

4.3.2. Побудова математичних моделей за результатами випробувань на втому. За результатами експерименту (згідно алгоритму та методиці, що представлена в п. 2.1) проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності критерію оптимізації, який характеризує границю витривалості сталі 40ХН зі зміцненим ІВГТЦПА поверхневим шаром технологічних та експлуатаційних факторів (табл. 3.4) [207]. Розрахунок моделі здійснювався за допомогою ППП ПРІАМ (2.7, 2.8, 2.9). В якості початкових даних використовувалися матриця планування (табл. 3.4) та результати експериментальних досліджень.

Після обробки результатів експерименту отримана математична модель, що описує залежність границі витривалості від технологічних та експлуатаційних факторів [208].

$$Y_3 = 554,961 + 321,398x_1^2 x_2^2 x_3 x_5^2 + 14,4129x_4 + 39,8087x_1x_4x_5, \quad (4.19)$$

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

Формули переходу від кодованих значень до натуральних представлено в п. 4.1.2 (4.2 – 4.17).

Отримана залежність, перевірена на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики (див. п. 2.1.). Результати статистичного аналізу представлені в таблиці 4.5.

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G – критерієм Кохрена. Для отриманої регресійної залежності $G_{розр} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь

розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Таблиця 4.5 – Статистичні характеристики моделей

Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_3
Аналіз адекватності моделі	
Залишкова дисперсія	103,241
Дисперсія відтворюваності	1033,31
Розрахункове значення F-критерію	1,0087
Параметри статистичного аналізу	Значення параметрів для моделей
	Y_3
Рівень значимості F-критерію для адекватності для ступенів свободи.	0,05 $V_1 = 3$ $V_2 = 12$
Табличне значення F-критерію для адекватності	2,5988
Стандартна помилка оцінки.	10,979
Стандартна помилка оцінки, скоректована з урахуванням ступенів свободи	11,7934
Модель адекватна	
Аналіз інформативності моделі	
Частка розсіювання, що пояснюється моделлю	0,860223
Уведено регресорів	4
Коефіцієнт множинної кореляції	0,927482

Коефіцієнт множинної кореляції, скоректований з урахуванням ступенів свободи	0,915816
F відношення для R	24,617
Рівень значимості F-критерію для інформативності для ступенів свободи	0,05 V1 = 3 V2 = 28
Табличне значення F-критерію для інформативності	2,94669
Критерій Бокса й Веца для інформативності.	2
Модель інформативна	

Перевірка гіпотези на адекватність отриманої моделі результатам експерименту проводилася з використанням F – критерію Фішера. Для одержання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

Оцінка якості отриманої математичної моделі проводився шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковими експериментальними результатами.

В отриманій математичній моделі коефіцієнти множинної кореляції статистично значимі, тобто $F_{\text{розр}} > F_{\text{табл}}$, при прийнятому рівні значимості. Отже, модель, інформативна і несе корисну інформацію про процес, що моделюється.

Для визначених факторів проведено графічне дослідження їх впливу на критерій оптимізації, що характеризує границю витривалості сталі 40XH із зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА. Воно виконувалося шляхом побудови сімейства графіків частинних рівнянь регресії (рис. 4.41 – 4.43).

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити те значення факторів, яке

на протязі всього часу впливу здійснює найбільший чи найменший ефект.

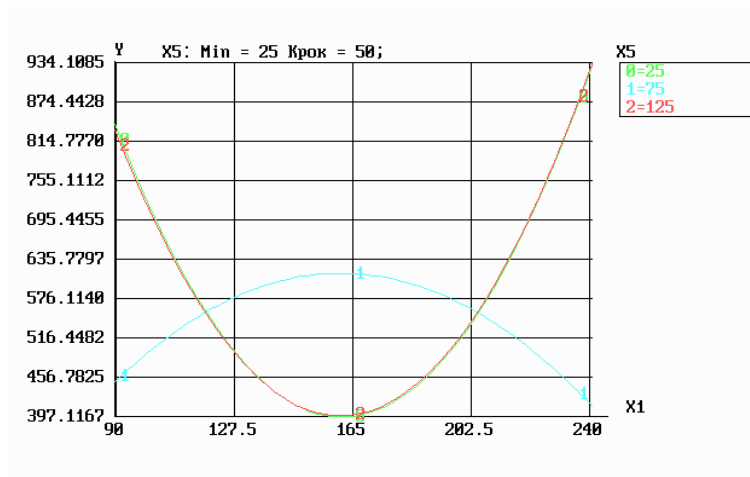


Рисунок 4.41 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_3 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=137,5$ Па, $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_4=773$ °К

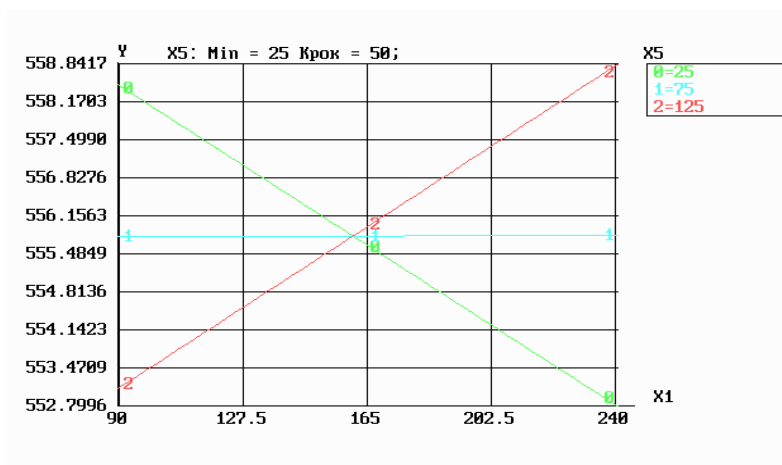


Рисунок 4.42 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_3 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=137,5$ Па, $X_3=75\%Ar+25\%N_2$, $X_4=773$ °К

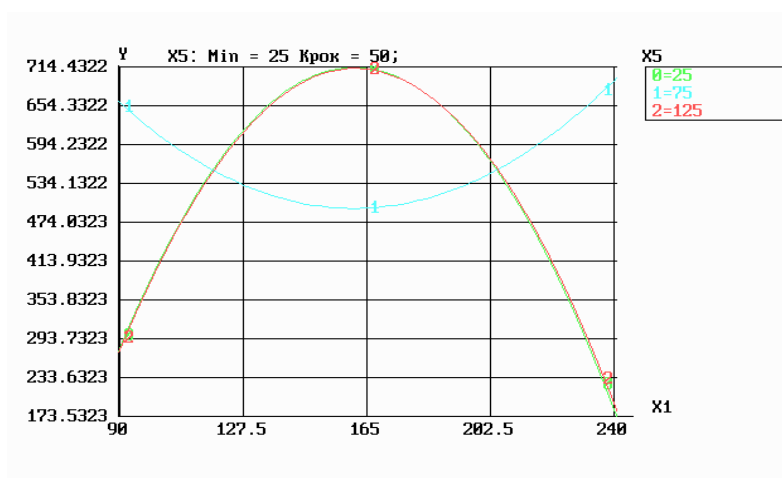


Рисунок 4.43 – Графіки частинних рівнянь регресії $Y_3 = f(X_1, X_5)$ при $X_2=137,5$ Па, $X_3=90\%Ar+10\%N_2$, $X_4=773$ °К

На основі отриманих результатів можна одержати наочне уявлення про геометричний образ функції відгуку побудовою відповідної геометричної поверхні, які представлено для границі витривалості на рис. 4.44 – 4.47.

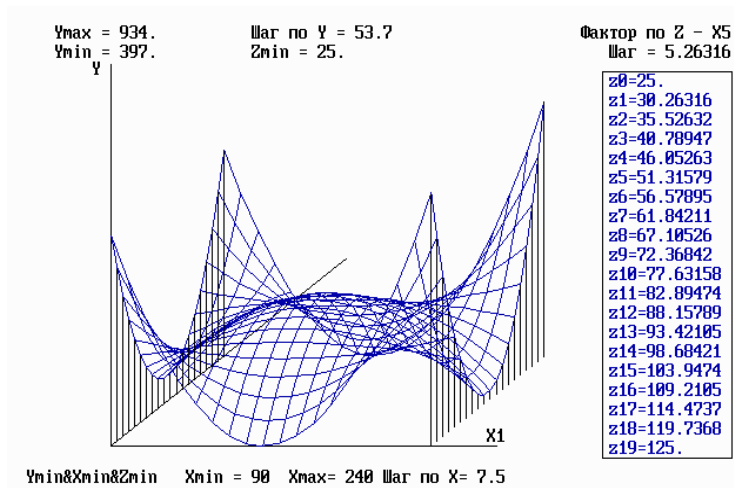


Рисунок 4.44 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_2=137,5$ Па, $X_3=60\%Ar+40\%N_2$, $X_6= 773$ °К

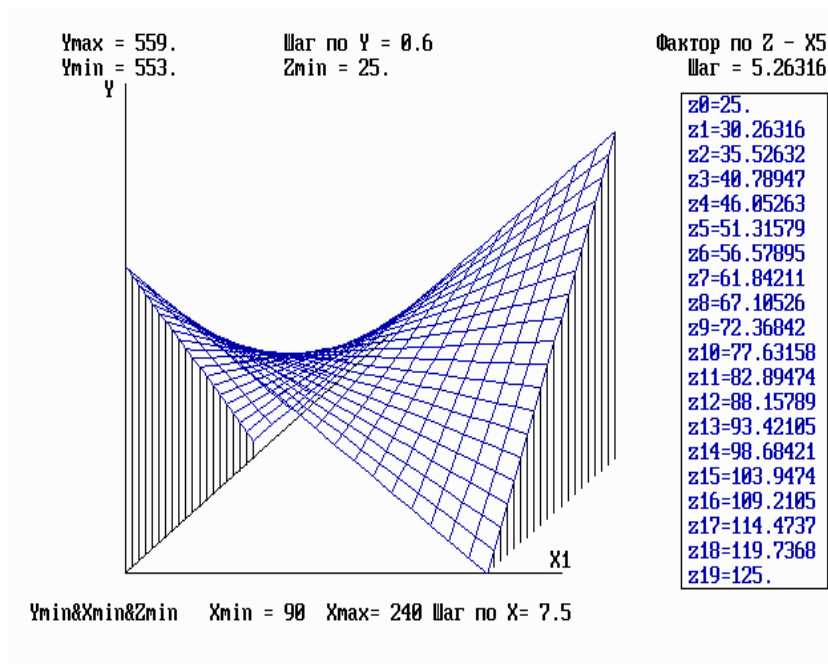


Рисунок 4.45 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_2=137,5$ Па, $X_3=75\%Ar+25\%N_2$, $X_6= 773$ °К

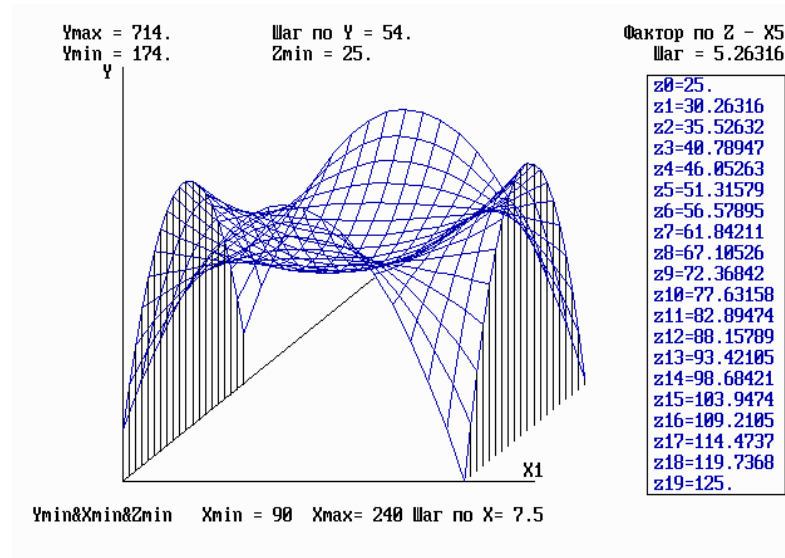


Рисунок 4.46 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_2=137,5$ Па, $X_3=90\%Ar+10\%N_2$, $X_6= 773$ °К

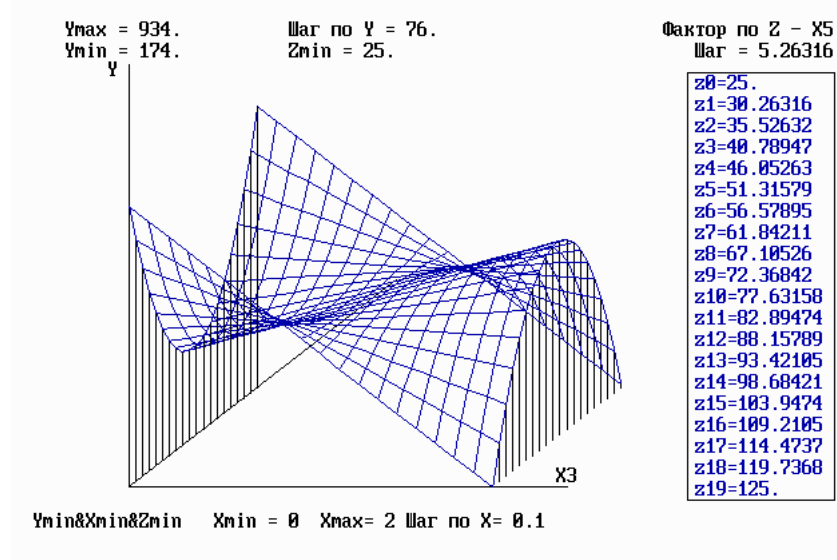


Рисунок 4.47 – Графік дослідження поверхні відгуку $Y_3 = f(X_1, X_5)$ в тривимірному просторі при $X_1=240$ хв., $X_2=137,5$ Па, $X_4= 773$ °К

Результати статистичного аналізу дозволяють зробити висновок, що регресійна залежність адекватна та інформативна, результати відтворені, коефіцієнти b_0 і b_1 статистично значимі. Усе це говорить про те, що регресійна залежність адекватно описує процес і її можна використовувати для аналізу й оптимізації технологічного процесу ІВГТЦПА.

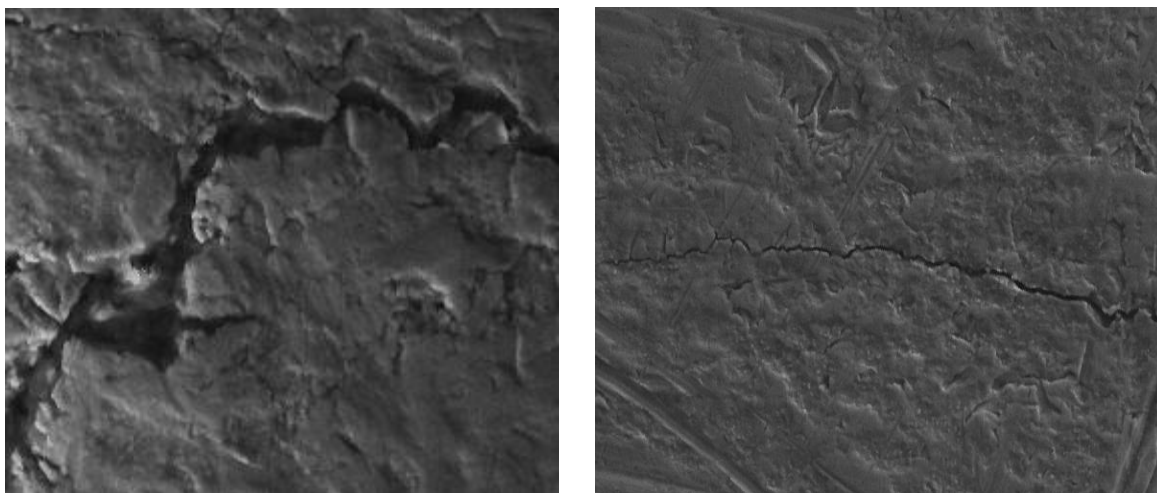
4.3.3. Фрактографічний аналіз руйнування зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони. Порівняльному фактографічному аналізу підлягали як не зміцнені так і зразки зміцнені ІВГТЦПА. При цьому вивчався процес поетапного руйнування від втоми починаючи від стадії проростання тріщини до її розповсюдження. Для фрактографічних досліджень використовувалася макроскопічна і мікроскопічна фрактографія зломів зразків. Проведення макроскопічної фрактографії, а саме вивчення поверхні злому при невеликому збільшенні (до 10^x) дозволило встановити характер руйнування; вид, напрямок, розміщення місця початку руйнування; стан матеріалу зразка під час руйнування (пластичне, крихке і т.п.). Мікроскопічна фрактографія, а саме вивчення і аналіз поверхні злому при великому збільшенні ($70^x \dots 1000^x$) проводилася з використанням методу електронної мікроскопії на електронному мікроскопі-мікроаналізаторі “Camscan-4DV”.

Відомо, що за класичною схемою тріщина від втоми починає розвиватися в поверхневому шарі і розповсюджується в глибину деталі. При цьому механізм виникнення тріщин та її розповсюдження залежить від рівнів деформації [200].

В результаті порівняльного фактографічного аналізу встановлено характер руйнування, який полягає у тому, що у не зміцненому 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. Напрямок розповсюдження тріщини визначається неоднорідністю напруженого стану викликаного впливом технологічних та експлуатаційних факторів.

При дослідження 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. На рис. 4.48 показано характер розвитку втомної тріщини у зразку зі сталі 40ХН без зміцнення та зі зміцненням ІВГТЦПА.



1, x 200

2, x 200

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

Рисунок 4.48 – Характер розвитку тріщини по поверхні зразка

Аналіз виду тріщини показує, що в зразках без зміцненого поверхневого шару (рис. 4.48, 1), тріщина має розгалужено-зигзагоподібний напрямок руху. Навпаки, зразки із зміцненим поверхневим шаром характеризуються тріщинами тільки зигзагоподібного напрямку розповсюдження, що пояснюється блокуванням виходу тріщини на поверхню іонно-азотованим шаром (рис. 4.48, 2).

Згідно п. 2.2. коливання зразка здійснюється в умовах високочастотного навантаження за третьою формою коливань руйнування. Таким чином, в результаті макроскопічної фрактографії руйнування зразків встановлено, що майже всі зразки руйнувалися в місцях найбільших напружень (рис. 4.49).

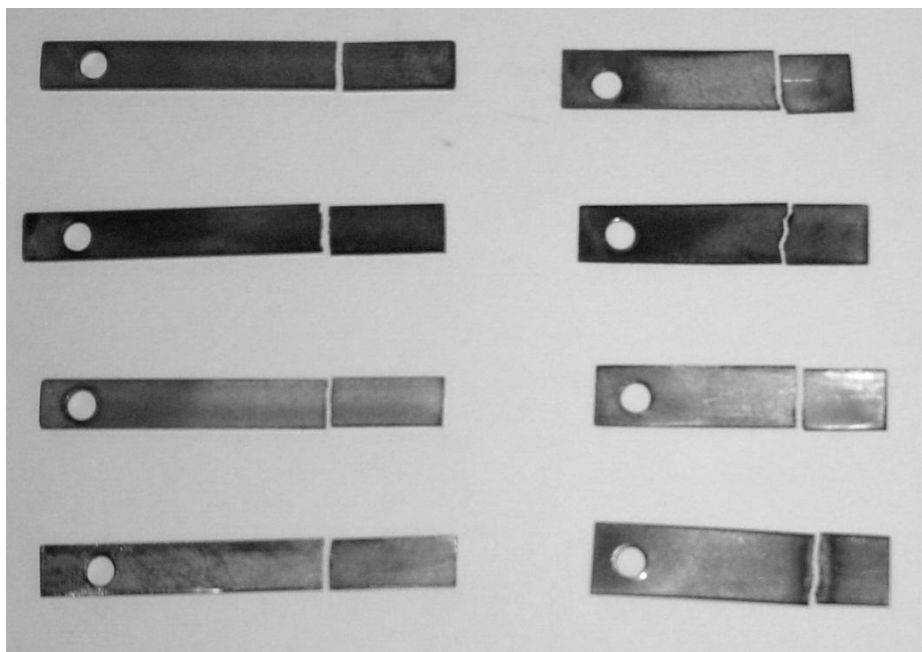
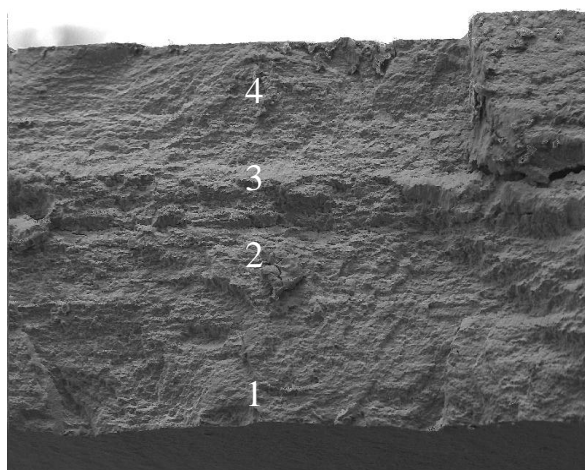
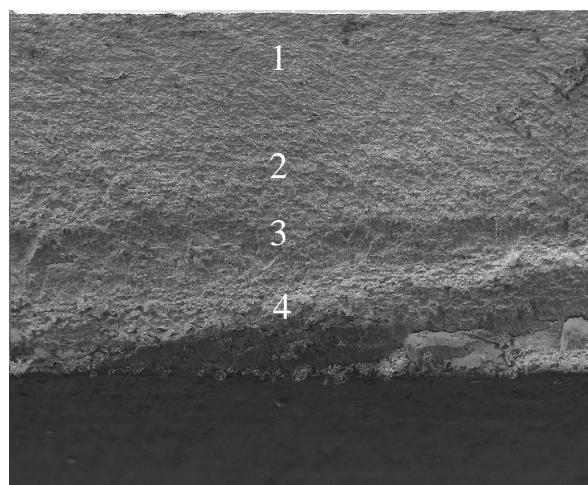


Рисунок 4.49 – Характер руйнування зразків

Аналіз мікроскопічних знімків ділянок зломів підтверджує висновки макроскопічної фрактографії. Виявлено наявність чотирьох зон, що відрізняються за своєю будовою (рис. 4.50)



1, x 78



2, x 70

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

Рисунок 4.50 – Мікрофракторграма злому від втоми зразка зі сталі 40ХН

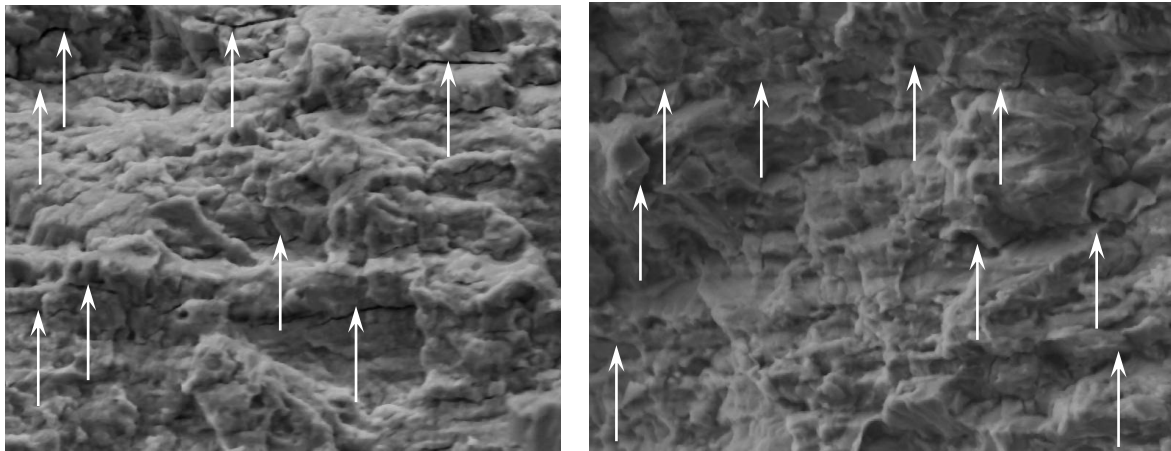
У зоні 1 – повільного розвитку тріщини з утворенням наклепаної поверхні – втомні мікросмуги (початкового й повільного розвитку тріщини) зупинки фронту розвитку тріщини знаходяться щільно одна коло одної. Так у підповерхневому зміцненому шарі зони 1 (повільного розвитку тріщини з утворенням наклепаної поверхні) виявлено поступове, у залежності від технологічних і експлуатаційних факторів) проникнення втомленого руйнування в основу зразка. Ця зона має мікросмуги, що утворені при русі краю тріщини. Перші мікросмуги, які характеризують лінії зсуву, з’являються в місцях дефектів структури і т.п., поступово розширюються по мірі збільшення числа циклів, перетворюючись у смуги ковзання, які є початком тріщин втоми. Перша стадія закінчується появою мікротріщин і є дуже короткою. Зростання тріщини в початковій стадії руйнування є повільним.

При цьому, особливістю розвитку тріщин від втоми є стрибкоподібний характер їх руху, що зумовлено черговістю повторення процесів пластичної деформації та крихкого руйнування. Поки розмір зони пластичної деформації спереду тріщини малий у порівнянні з її довжиною, спостерігається стабільне зростання тріщини через приєднання до неї дефектів. Подальше циклічне навантаження приводить до накопичення дефектів в усій зоні пластичної деформації, наслідком чого є вичерпання пластичності сталі в цій області і стрибкоподібне зростання тріщини на значення, що відповідає зоні пластичної деформації.

У зоні 2 – повільного розвитку тріщини – втомні мікросмуги розміщені істотно подалі одна від одної, ніж в зоні 1. Ця зона ще має назву зона “пористої будови”.

На рис. 4.51 з використанням засобів мікроскопічної фрактографії досліджено зону 2, як зміцненого так і не зміцненого ІВГТЦПА зразка. Встановлено, що в умовах високочастотних випробувань значна кількість утворених мікротріщин, що розміщені перпендикулярно смугам втоми матеріалу, за цикл випробування не встигають злитися в макроскопічну

тріщину, і після кінцевого злому залишається тонкий шар, який густо насичений порами та дрібними тріщинами.



1, x 1000

2, x 1000

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

Рисунок 4.51 – Мікрофрактограма злому від втоми зразка зі сталі 40ХН

У зоні 3 – швидкого розвитку тріщини – втомні мікросмуги розміщені на значній відстані один від одного. Зона 3 характеризується стрімким розповсюдженням тріщини, яка супроводжується релаксацією пружної енергії й утворенням нової зони пластичної деформації. Повторення цього процесу приводить до дискретності росту тріщини від втоми. Зі збільшенням напружень швидкість руху тріщини зростає, в зв'язку з чим збільшується і шорсткість злому. В зоні кристалічного злому швидкість тріщини досягає надзвукових значень.

У зоні 4 – зоні долому – присутні признаки як пластичного, так і крихкого руйнування. Характер злому з наявною перевагою мікроям притаманний всім зонам долому після втомного злому та має великозернистий характер і пов'язаний з досягненням критичних значень напружень у вершині тріщини. Подальше збільшення числа циклів навантаження приводить до злиття мікротріщин у тріщини. Далі проходить розвиток макроскопічної

тріщини, яка проникає в середину зразка – приводить до різкого зниження міцності і раптового крихкого руйнування. Це значно збільшує швидкість розповсюдження тріщини і послідуєчого різкого руйнування.

В результаті макро- і мікроскопічної фрактографії встановлено, що величина зон, а також і швидкість розповсюдження тріщини, залежить від параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА та умов експериментальних досліджень.

Таким чином, в результаті фактографічного аналізу встановлено:

- замкові різьбові з'єднання бурильних труб є важливими елементами, які в умовах циклічного навантаження підлягають втомному руйнуванню, а це може привести до аварій при бурінні;
- причина зародження тріщин від втоми характеризується поступовим накопиченням дефектів кристалічної решітки;
- технологічний процес ІВГТЦПА змінює характер руйнування конструкційних елементів бурильної колони від втоми;
- підвищення границі витривалості пов'язано з зародженням тріщини від втоми у підповерхневому зміцненому шарі;
- підвищення циклічної міцності характеризується видом злому де збільшується зона 1 та зменшується зона 4.

4.3.4. Аналіз напружено-деформованого стану зміцнених поверхонь конструктивних елементів бурильної колони за допомогою методу кінцево-елементного аналізу. Розрахунок напружено-деформованого стану розглянуто на прикладі зразка для магніострикційного випробування на втому (рис. 4.35). Дослідження проводилися з використанням порівняння напружено-деформованого стану зразка зі сталі 40ХН, як із зміцненням ІВГТЦПА, так і без зміцнення [199]. Моделювання та розрахунки напружено-деформованого стану здійснювалися за допомогою програмного забезпечення NASTRAN [196].

В якості початкових даних застосовувалися фізичні властивості сталі 40ХН [196]:

- щільність матеріалу – $\rho = 7820 \text{ кг/м}^3$;
- коефіцієнт лінійного розширення – $\alpha_l = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ Град}^{-1}$;
- коефіцієнт теплопровідності – $\lambda = 44 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$;
- питома теплоємність – $C = 466 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$;
- модуль Юнга – $E = 200 \cdot 10^6 \text{ Па}$;
- модуль зсуву – $G = 85 \cdot 10^6 \text{ Па}$;
- коефіцієнт Пуассона – $\mu = 0,25$.

При цьому, модель напружено-деформованого стану характеризується поділом зразка на кінцеві елементи з полями переміщень в умовах дії втомного навантаження. В якості циклічного навантаження до зразка використовували робочу частоту установки 10 кГц (п. 2.2), що прикладена в точці його закріплення. Модель напружено-деформованого стану зразка 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 [199].

На рис. 4.52 представлено модель напружено-деформованого стану зразка з полями еквівалентних напружень без зміцненого поверхневого шару при середньому напруженні циклу та наявності двох вузлових ліній. Найбільша величина напружень в поверхневому шарі становить $7,66 \cdot 10^{13} \text{ Па}$, що характеризує основну умову виникнення тріщини на поверхні зразка. На рис. 4.53 представлено графік зміни напружень по довжині зразка без зміцнення при цьому найбільші еквівалентні напруження становлять $4,4 \cdot 10^{13} \text{ Па}$, які знаходяться у другій вузловій лінії і приводять до руйнування.

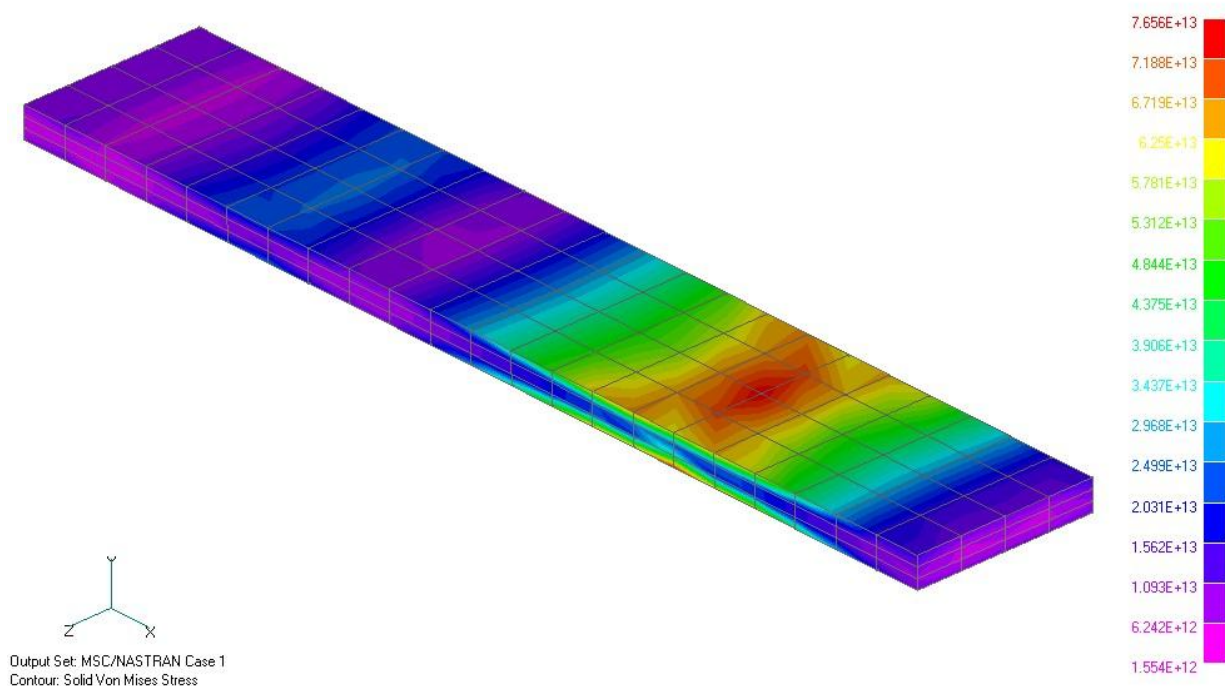


Рисунок 4.52 – Модель напружено-деформованого стану зразка без зміцнення при середньому напруженні циклу, Па

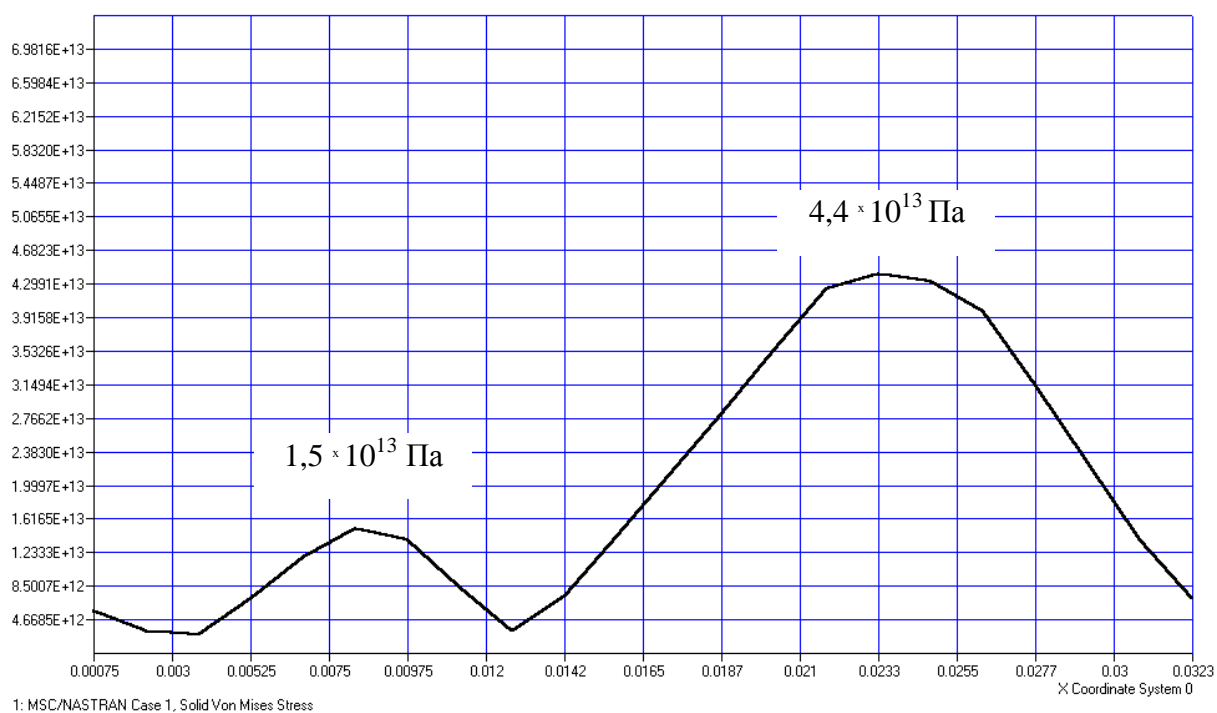


Рисунок 4.53 – Графік зміни напружень по довжині зразка без зміцнення при середньому напруженні циклу

На рис. 4.54, 4.55 та 4.56 представлено модель напружено-деформованого стану зразка з полями еквівалентних напружень у моделі зміцненого ІВГТЦПА зразка зі сталі 40ХН при максимальному, середньому та мінімальному напруженні циклу.

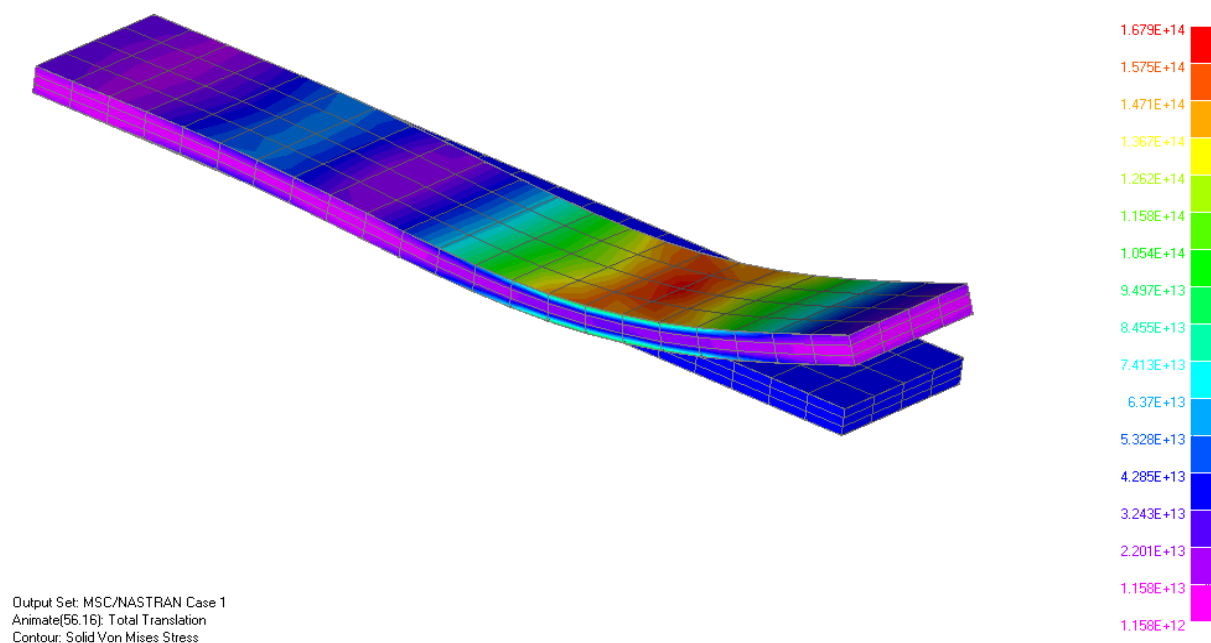


Рисунок 4.54 – Модель напружено-деформованого стану зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу, Па

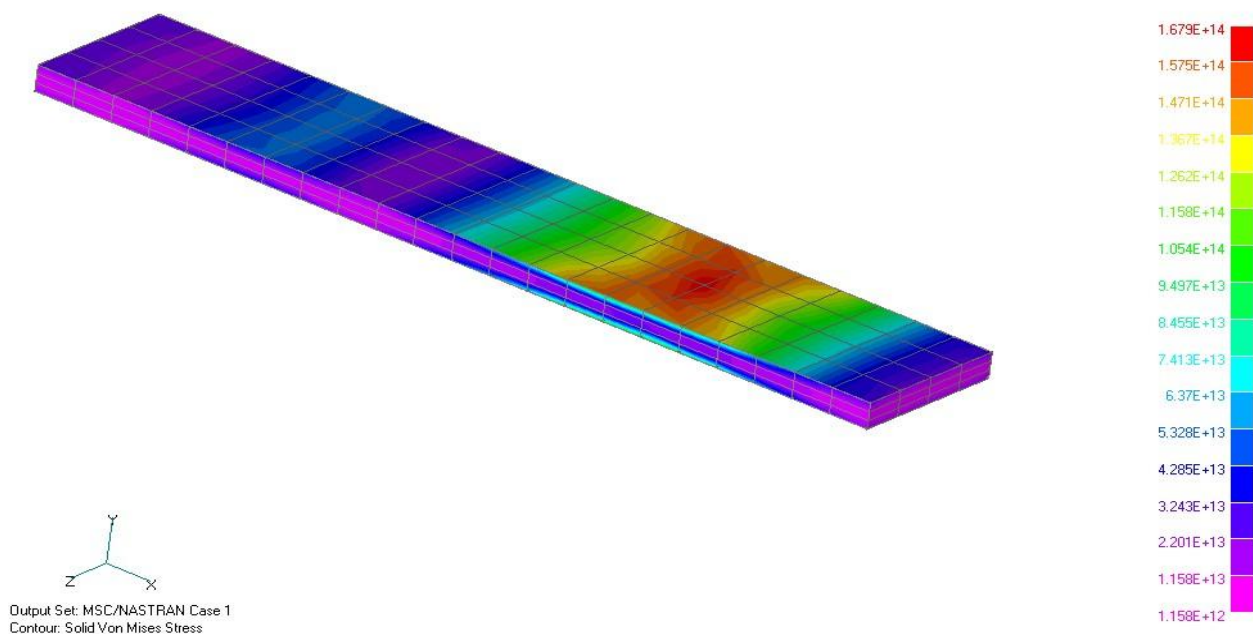


Рисунок 4.55 – Модель напружено-деформованого стану зміцненого зразка при середньому напруженні циклу, Па

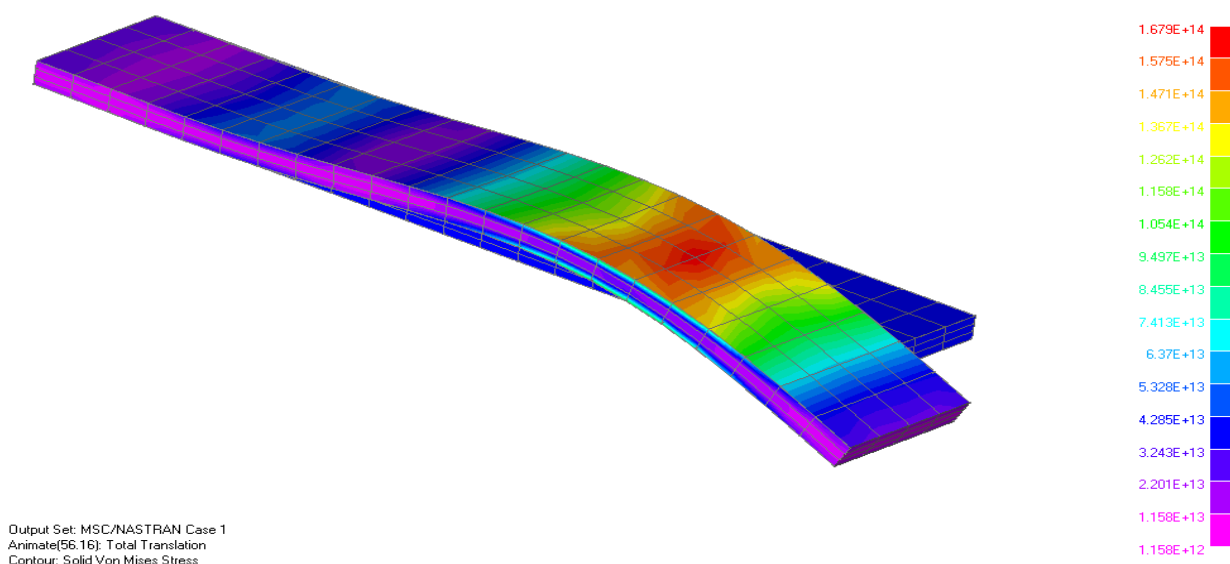
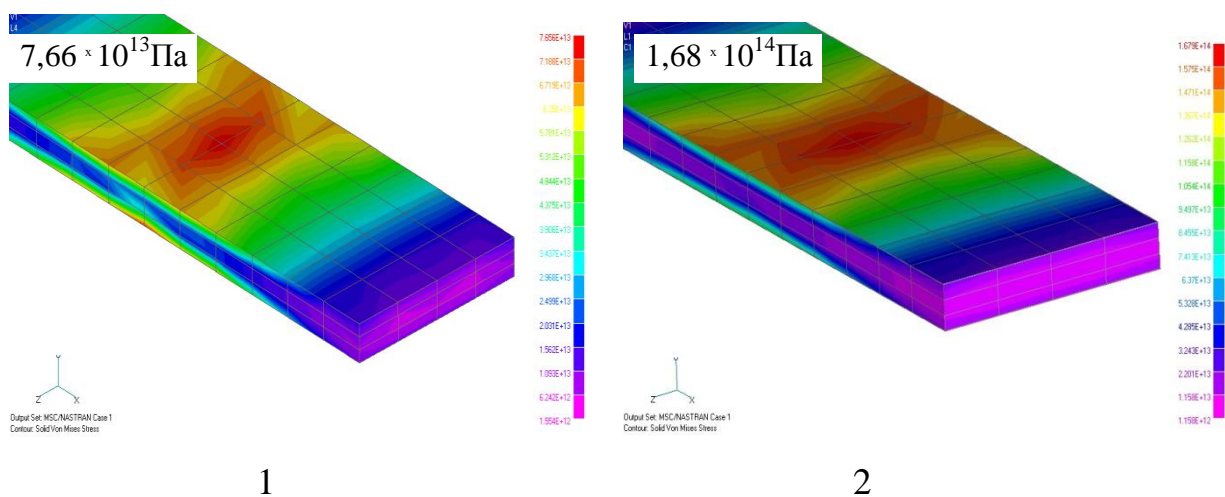


Рисунок 4.56 – Модель напружено-деформованого стану зміцненого зразка при мінімальному напруженні циклу, Па

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. 4.57). Показано, що напруження, які може витримувати зміцнений зразок збільшилися до 2,1 рази.



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

Рисунок 4.57 – Порівняння моделей напружено-деформованого стану не зміцненого та зміцненого зразка

На рис. 4.58 зображено графік зміни напружень по довжині зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу

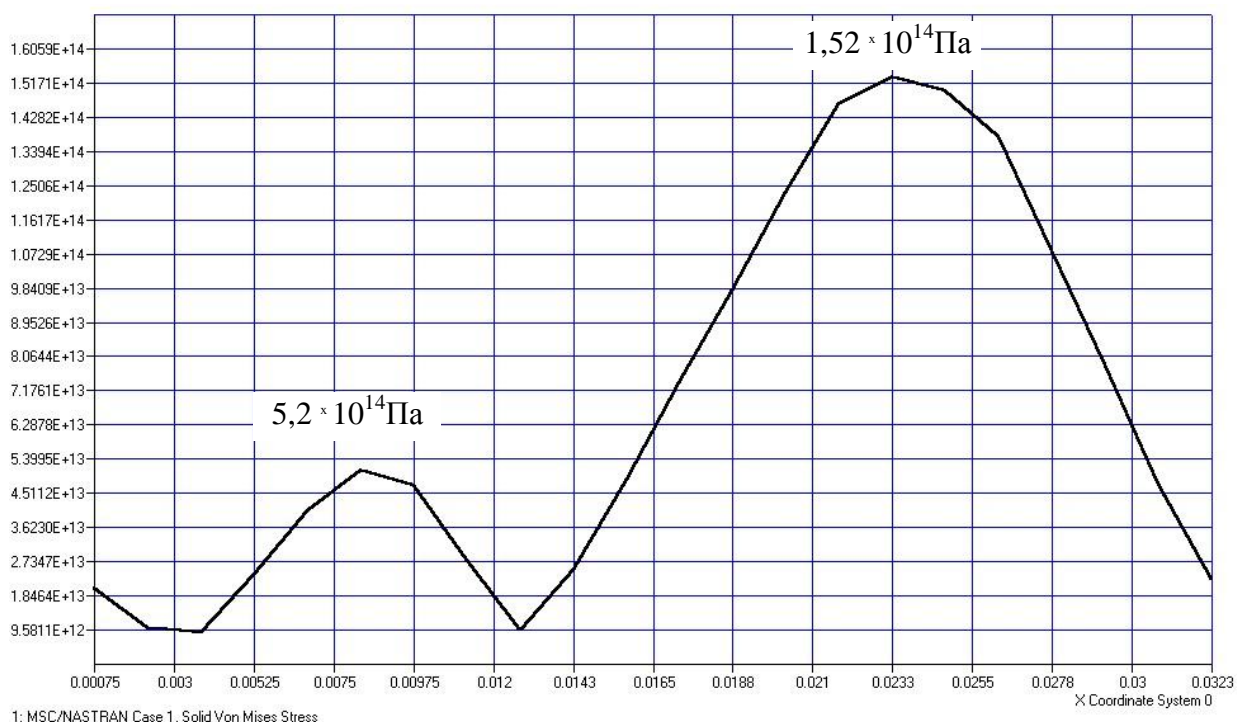


Рисунок 4.58 – Графік зміни напружень по довжині зміцненого зразка при максимальному напруженні циклу

Показано, що значення максимальних напружень, які приводять до руйнування зразка зі зміцненим поверхневим шаром зростають до $1,52 \cdot 10^{14}$ Па, що свідчить про сприйняття іонно-азотованим шаром значної частини напружень при збереженні працездатності конструкційних елементів зі сталі 40ХН.

Таким чином, за допомогою методу кінцево-елементного аналізу можна передбачити роботу зміцнених конструктивних елементів бурильної колони в умовах дії циклічних навантажень, а саме границю витривалості, кількість циклів до руйнування та визначити місце, вид і характер руйнування.

4.4 Результати втомних випробувань замкових різьбових з'єднань бурильної колони при циклічному згині.

При проведенні експериментальних досліджень замкові різьбові з'єднання згвинчували з оптимальним крутним моментом $M_{кр} = 420-450 \cdot \text{Нм}$, вага вантажу, яка створювала напруження згину в замковому різьбовому з'єднанні становила 40 кг. Для проведення експериментальних досліджень було використано 2 зразки, які піддавалися термообробці і 3 зразки після термообробки були зміцнені удосконаленням 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 обертань зразка (15,2 Гц) та навантаження на протязі всього часу дослідження підтримували постійною.

На основі отриманих результатів дослідів можна зробити наступні висновки.

Випробувальні зразки ламалися в конусі ніпеля у впадині останнього витка різьби, це пояснюється тим, що ніпель працює в асиметричних напруженнях і перша тріщина у впадині витка розвивається як магістральна.

Зразки які були термооброблені витримали 0,03235 та 0,03189 млн. циклів, а зразки, які були додатково зміцнені удосконаленням ІВГТЦПА в оптимальному режимі, витримали 0,06156, 0,06381 та 0,05751 млн. циклів відповідно.

У підсумку слід сказати, що удосконалений метод ІВГТЦПА дозволив збільшити кількість робочих циклів замкового різьбового з'єднання до його руйнування в 1,8 – 2 рази, в порівнянні з термообробленими зразками.

Висновки до розділу 4

1. В результаті експериментальних досліджень встановлено закономірність впливу технологічних параметрів ІВГТЦПА на механічні властивості зміцненого поверхневого шару. Показано, що завдяки використанню ІВГТЦПА підвищується зносостійкість у 1,8...2,2 рази, а корозійна стійкість – у 1,7...3,1 рази та границя витривалості на 20...40%, у залежності від технологічного режиму його формування.

2. Розроблено математичні моделі технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА за критеріями границі витривалості, зносо- і корозійної стійкості, які сприяють розробці принципу управління властивостями поверхневого шару.

3. Встановлено механізм руйнування зразка із зміцненим дифузійним шаром від втоми, який полягає в зародженні тріщини в під поверхневому шарі із подальшим її розвитком на поверхню.

4. На підставі аналізу напружено-деформованого стану можна прогнозувати процес руйнування від втоми, що дозволяє в широких межах керувати режимами технологічного процесу.

5. Використання ІВГТЦПА дозволить підвищити ресурс конструкційних елементів БК, а саме ЗРЗ, а також прогнозувати їх працездатність. Це надасть можливість підвищити ефективність роботи БК, що в свою чергу приведе до зменшення ускладнень і аварій при бурінні свердловин.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЗАМКОВИХ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

Підвищення працездатності та збільшення ресурсу ЗРЗ БК має важливе значення, так як вони підвищують економічну ефективність процесу буріння.

У відповідності з метою та задачами, що поставлені в дисертаційній роботі, на основі узагальнення комплексу експериментально-теоретичних досліджень вирішено важливе наукове завдання щодо розроблення комплексу науково-обґрунтованих рішень для підвищення працездатності ЗРЗ БК, що зумовлено високим рівнем експлуатаційних властивостей поверхневого шару при зміцненні ІВГТЦПА, які працюють в умовах одночасного впливу високих динамічних навантажень, зношування та агресивного середовища.

В розділі проведено узагальнення проведених дисертаційних досліджень щодо оптимізації технологічного процесу та розроблено методику підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦПА та запропоновано підхід до проведення техніко-економічного аналізу промислового використання удосконаленого технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару. В висновках до розділу здійснено узагальнення результатів дисертаційних досліджень.

5.1 Визначення оптимальних параметрів удосконаленого технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування

При вирішенні оптимізаційної задачі технологічний процес ІВГТЦПА характеризується критеріями оптимізації, таким як: границя витривалості (Y_1), інтенсивність зношування (Y_2) та питома збільшення маси зразка (Y_3). У

зв'язку з цим постає питання вибору важливого з цих критеріїв, шляхом використання методу експертних оцінок та призначення їм вагових коефіцієнтів. Це зумовлено тим, що кожний критерій оптимізації окремо впливає на оптимальне значення параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА і цей може бути різним. При цьому, покращуючи значення одного критерію оптимізації можна погіршити значення інших двох (табл. 3.1.), так як вони є нерівнозначними (див. п. 3.1.). Таким чином, виникає задача визначення деякої компромісної точки, яка в рівній мірі може задовольняти всім вимогам (компроміс за Парето) [125], тобто необхідно визначити такі умови функціонування системи, за якими узагальнений критерій оптимальності її досягає екстремального значення [201].

За методикою планування експерименту (п. 2.1) визначення узагальненого критерію, для кожного дослідження експериментальних випробувань (табл. 3.3, 3.4), полягало у використанні системи експертних оцінок (експерти із Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України), згідно якої кожному критерію оптимізації встановлено "рейтинг". За результатами всіх відповідей експертів виконувався розрахунок рангів та вагових коефіцієнтів. Результати обчислень представлено в табл. 5.1.

Таким чином, на основі результатів експериментальних досліджень та отриманих математичних моделей (4.1, 4.18, 4.19) проведено визначення оптимальних параметрів технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА шляхом розрахунку величини узагальненого критерію.

Результати розрахунку ефективності узагальненого критерію якості наведено в табл. 5.2.

З таблиці видно, що найбільше значення ефективності критерію якості (найменше значення узагальненого критерію) відповідає 2 дослідженню (табл. 3.4), а реалізовані технологічні параметри формування зміцненого поверхневого шару ІВГТЦПА і є оптимальними. Це значення узагальненого критерію якості є, по суті, відстанню точки факторного простору, що відповідає 2

дослідю, до гіпотетичної найкращої точки.

Таблиця 5.1 – Значення рангу критеріїв оптимізації

Експерти	Критерії оптимізації		
	σ_{-1}	I_{3H}	$\Delta m/m$
Експерт 1	1	2	3
Експерт 2	2	1	3
Експерт 3	1	2	3
Експерт 4	1	2	3
Експерт 5	1	3	2
Експерт 6	2	3	1
Експерт 7	1	3	2
Ранг P_i	1,29	2,26	2,43
Ваговий коефіцієнт K_i	1	0,756	0,715

Таблиця 5.2 – Результати багатокритеріальної оптимізації

№	Номер дослідю	Коефіцієнт ефективності ($u_{\text{ефект}}$)
1	2	0,683866596
2	9	0,603737245
3	8	0,566761496
4	13	0,516796803

Таким чином, у результаті проведеної багатокритеріальної оптимізації з використанням отриманих математичних моделей (4.1, 4.18, 4.19), визначено оптимальніше поєднання рівнів керованих факторів, що впливають на критерії оптимізації: 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 (рис. 5.1).

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, зносо- та корозійної стійкості (критеріїв оптимізації). Відхилення складають 3...7%, що свідчить про правильність отриманих результатів досліджень.



а – не зміцнений замок; б – зміцнений замок ІВГТЦПА.

Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд замка бурильної колони З-63,5 (ГОСТ 7918-75)

5.2 Розробка алгоритму підвищення працездатності замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням

При розробці та впровадженні технологічного процесу зміцнення ЗРЗ БК ІВГТЦПА необхідно виходити із задач забезпечення належної точності, форми поверхонь, надання поверхні у процесі обробки потрібних якостей: шорсткості, залишкових напружень, оптимального співвідношення характеристик міцності, зносостійкості та корозійної стійкості.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень

встановлено, що в наслідок модифікування поверхневого шару сталі 40ХН отримано нові властивості міцності, корозійної стійкості та зносостійкості, які кардинально відрізняються від властивостей основи, одержання оптимальних технологічних режимів формування зміцненого поверхневого шару дозволить підвищити працездатність ЗРЗ БК при одночасному одержанні економічного ефекту.

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

Даний алгоритм пропонується застосовуватися під час розробки, виробництва, експлуатації та ремонту ЗРЗ БК, і складається з трьох основних етапів (рис. 5.2).

На першому етапі виконується аналіз отриманої інформації щодо нових та продефектованих ЗРЗ БК та прийняття рішення щодо можливості їх подальшої експлуатації, а також необхідності їх поверхневого зміцнення удосконаленим технологічним процесом ІВГТЦПА, а саме:

- оцінюються геометричні та технічні параметри ЗРЗ БК та відповідності їх технічним умовам експлуатації. Висновок про подальше використання в експлуатації ЗРЗ БК здійснюється на основі аналізу величини їх зношування: величина зношування повинна бути меншою за максимально допустиму – якщо зношування є більшим – деталь підлягає відбракуванню;
- окрім величини зношування також аналізується стан та зовнішній вигляд замка БК: наявність корозії, забоїн, вм'ятин, рисок та інших дефектів, кількісні значення параметрів яких є нормованими та контрольованими: якщо ці значення знаходяться у межах допусків на дану деталь, то вона підлягає зміцненню, якщо ні – деталь відбраковується;
- проводиться оцінка можливості поверхневого зміцнення замка БК ІВГТЦПА.

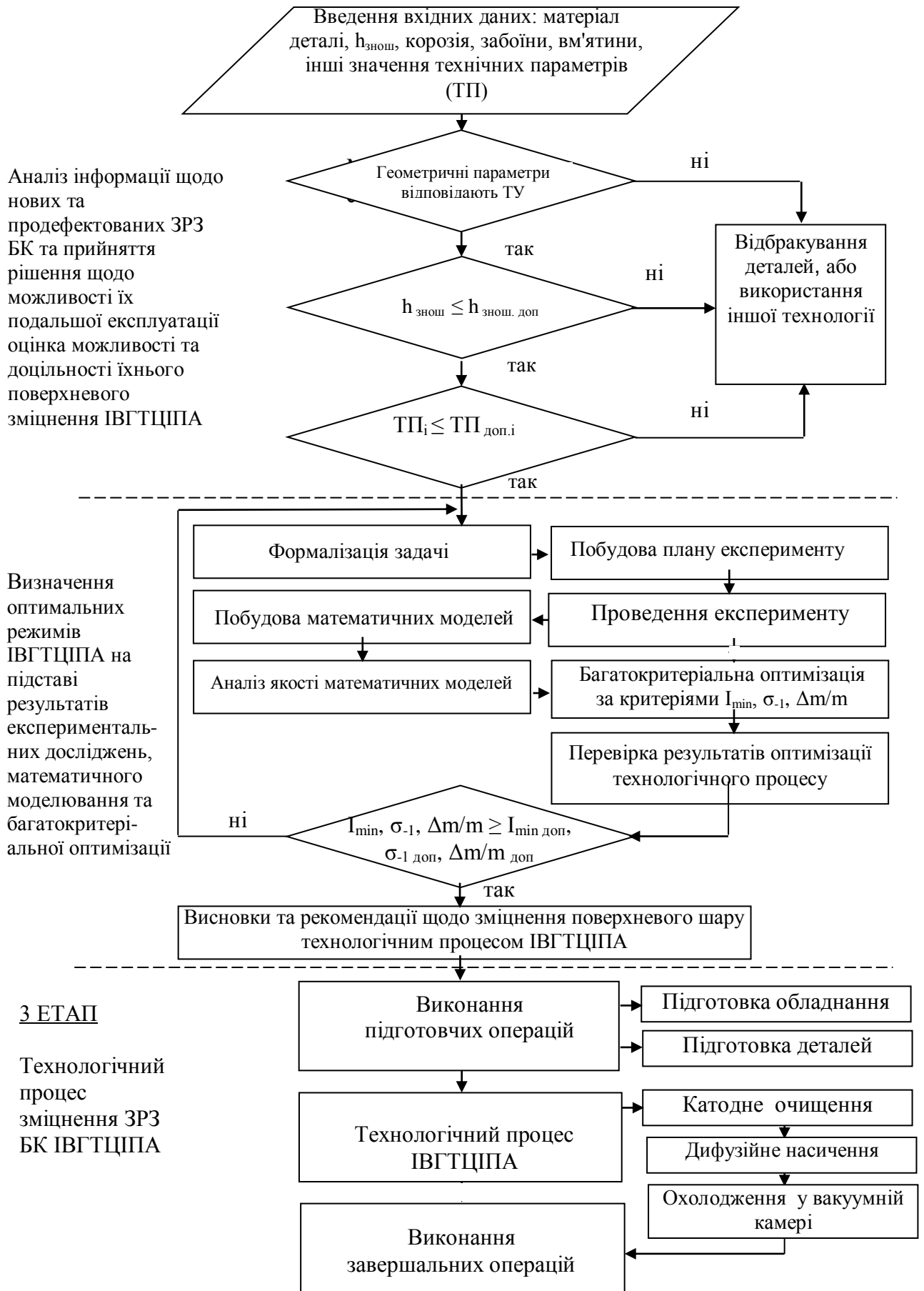


Рисунок 5.2 – Алгоритм процесу підвищення працездатності ЗРЗ БК ІВГТЦПА

На другому етапі здійснюється процедура описана в п. 2.1, а саме: визначення впливу керованих факторів на критерії оптимізації, отримання оптимальних параметрів технологічного процесу ІВГТЦПА на підставі результатів експериментальних досліджень, побудова математичних моделей за результатами експерименту та проведення багатокритеріальної оптимізації. На цьому етапу вирішуються наступні завдання:

- здійснюється формалізація завдання дослідження: визначається математичний апарат досліджень, визначаються критерії оптимізації, вибираються фактори шляхом їх ранжування та визначаються для них рівні варіювання, вибираються необхідні методики експериментальних досліджень;
- будується план експериментальних досліджень;
- проводиться зміцнення ЗРЗ БК ІВГТЦПА з наступним комплексом експериментальних досліджень (відповідно методиці планування експериментальних досліджень, п. 2.1.) та за варіантами, що визначені у матриці плану експерименту за натуральними значеннями (табл. 3.4);
- здійснюється попередній аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень;
- за результатами експериментальних досліджень будується математична модель залежності впливу керованих факторів на критерії оптимізації;
- здійснюється аналіз якості отриманої математичної моделі, а саме проводиться перевірка її інформативності, адекватності та відтворюваності;
- на основі побудованих математичних моделей проводяться розрахункові дослідження для визначення узагальненого критерію та вирішення компромісної задачі оптимізації за декількома критеріями;
- визначаються оптимальні параметри технологічного процесу ІВГТЦПА;
- робиться експериментальна перевірка на відтворюваність отриманих даних щодо оптимальних параметрів технологічного процесу. Якщо характеристики зміцнених ЗРЗ БК відповідають вимогам технічних умов, робляться висновки та рекомендації щодо зміцнення робочих поверхонь ЗРЗ БК шляхом проведення технологічного процесу ІВГТЦПА.

На третьому етапі проводиться технологічний процес поверхневого зміцнення робочих поверхонь ЗРЗ БК ІВГТЦПА за визначеними оптимальними режимами.

5.3 Техніко-економічне обґрунтування впровадження технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування

5.3.1. Кількісна оцінка працездатності зміцнених замкових різьбових з'єднань бурильної колони. Кількісна оцінка працездатності зміцнених ЗРЗ БК є необхідною умовою об'єктивного підходу щодо вирішення наукового завдання. Кількісна оцінка дозволить виявити вплив механічних властивостей зміцненого замка БК на загальну працездатність та порядок обслуговування БК, об'єктивно вирішувати задачі, що пов'язані із запобіганням ускладнень і аварій при бурінні свердловин.

Як відомо, працездатність це стан об'єкта, при якому він здатний виконувати свої функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією [2]. Кількісним показником, що характеризує працездатність є ресурс, а саме напрацювання до граничного стану, зазначеного в технічній документації [18].

Для оцінки впливу застосування удосконаленого технологічного процесу ІВГТЦПА на працездатність ЗРЗ БК в роботі проводилося визначення математичного очікування середнього напрацювання до переходу в граничний стан зміцнених експериментальних зразків зі сталі 40ХН. Згідно ДСТУ 2860-94 під граничним станом розуміють такий стан, при якому подальша експлуатація об'єкта недопустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне. Кількісну оцінку довговічності здійснювали на основі порівняльних триботехнічних досліджень не зміцнених і зміцнених зразків зі сталі 40ХН.

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 (п. 5.1.).

Дослідження виконувалися на машині тертя за методикою, наведеною у п.2.3. Для скорочення тривалості експерименту були обрані жорсткі умови його проведення: питома навантаження становила 25 МПа, швидкість ковзання – 0,4 м/с, мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-201. Критерієм переходу досліджуваних зразків до граничного стану було досягнення величини їх зносу 0,2 мм. Отже, напрацювання зразка до переходу в граничний стан визначався як час від початку його роботи до досягнення величини зносу зразка значення 0,2 мм. Таку величину максимально допустимого зносу було вибрано, виходячи з встановлених у технічній документації допустимих значень цього параметра для реальних конструкційних елементів із сталі 40ХН. Величину зносу заміряли через кожні 10 хв. роботи машини тертя. Значення зносу визначали як відношення різниці у вазі зразка перед випробуваннями та після них до твору щільності сталі 40ХН на площу контакту зразка з контртіло.

Математичне сподівання середнього напрацювання досліджуваних зразків до переходу в граничний стан, який за даних умов проведення експерименту, дорівнює їх середньому напрацюванню до заміни або середньому технічному ресурсу, визначали за формулою [209]:

$$\bar{\tau}_i = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N},$$

де τ_i - напрацювання до переходу в граничний стан i -го зразка; N -кількість досліджуваних зразків.

Результати досліджень наведено в табл. 5.3.

Таким чином, середній технічний ресурс становить 167 хв. для термооброблених без ІВГТЦПА зразків і 414 хв. – для зміцнених ІВГТЦПА зразків. Тому, середній технічний ресурс зміцнених ІВГТЦПА зразків

виявився в 2,47 рази більше, ніж в термооброблених без ІВГТЦПА.

Зміцнення ЗРЗ БК ІВГТЦПА дозволяє збільшити їх довговічність, що сприяє підвищенню працездатності ЗРЗ БК і призводить до зниження ускладнень і аварій при бурінні свердловин.

Таблиця 5.3 – Напрацювання зразків до переходу в граничний стан

Зразки після ТО				Зразки після ТО + ІВГТЦПА			
№ зразка, i	τ_i , хв.	№ зразка, i	τ_i , хв.	№ зразки, i	τ_i , хв.	№ зразка, i	τ_i , хв.
1	160	11	170	1	370	11	410
2	200	12	150	2	400	12	370
3	170	13	140	3	360	13	380
4	150	14	190	4	370	14	380
5	180	15	180	5	360	15	370
6	170	16	170	6	380	16	370
7	160	17	130	7	360	17	360
8	190	18	160	8	380	18	370
9	170	19	140	9	390	19	390
10	190	20	160	10	380	20	390

5.3.2. Економічна ефективність технологічного процесу зміцнення замкових різьбових з'єднань імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням [210]. Для більшості вакуумних технологій, яким і є ІВГТЦПА, необхідною умовою є автоматизація технологічного процесу формування зміцненого поверхневого шару при можливості відтворення отриманих результатів у подальшому. Статистичний характер ряду параметрів технологічного процесу та їх множина, від яких залежить якість зміцненого поверхневого шару, короткочасної взаємодії частинок легуючого газу в імпульсному енергетичному режимі з поверхнею деталі є жорсткими вимогами до

стабільності технологічного процесу. Якісне формування зміцненого поверхневого шару в умовах ручного управління при можливому серійному виробництві практично виключається зі вказаних вище факторів.

Таким чином, єдиним шляхом для підвищення надійності технологічного процесу ІВГТЦПА є автоматизація процесу формування зміцненого поверхневого шару. Перед дослідниками, розробниками, виробниками обладнання виникає задача оцінки економічної доцільності виготовлення обладнання з необхідним рівнем автоматизації та визначення нижньої межі вартості зміцненого замка БК без зниження його механічних властивостей. Крім цього, відомим є те, що досвід створення і використання гнучких виробничих систем і автоматизованих виробництв показали, що автоматизація окремих технологічних операцій і процесів може не тільки не дати економічного ефекту, який очікується, а і привести до фінансових втрат.

Тому постає завдання у необхідності розробки методики визначення нижньої межі вартості зміцненого замка БК ІВГТЦПА без зниження якості сформованого поверхневого шару для отримання економічного ефекту.

Однією із задач є визначення річної потреби у зміцнених замках БК ІВГТЦПА. Виходячи з річного бюджету робочого часу (біля 2000 год.) при роботі в одну зміну, можна оцінити граничну програму річного випуску замків БК на півавтоматичному обладнанні з ручним завантаження-розвантаження в 0,85...1,5 тис. деталей. Перевищення цієї межі в більшості випадках потребує автоматизації транспортних операцій і операцій завантаження-розвантаження.

Однією з характеристик являється початкова вартість замка БК без зміцненого поверхневого шару. Формування зміцненого дифузійного шару на поверхні деталі завжди збільшує її вартість, для отримання економічної ефективності це повинно компенсуватися підвищенням експлуатаційних якостей деталі, тобто збільшенням ресурсу її роботи. Ресурс роботи деталі зі зміцненим поверхневим шаром являється експлуатаційною характеристикою, яка об'єднує можливості конкретного технологічного процесу створення зміцненої деталі.

Економічна ефективність замка БК зі зміцненим поверхневим шаром може бути отримана в процесі його експлуатації, а основний ефект саме і проявляється в результаті збільшення строку експлуатації.

Розрахуємо річний економічний ефект від впровадження технології зміцнення ЗРЗ БК:

$$E = \left[C_1 \frac{y_1}{y_2} + \frac{u'_1 - u'_2}{y_2} + E_H \frac{K'_2 - K'_1}{y_2} - C_2 \right] N_2, \quad (5.1)$$

де, C_1, C_2 – вартість базового і зміцненого замка БК, грн.; y_1 і y_2 – питома витрата базових і нових замків БК в рік, в натуральних одиницях $\left(y_1 = \frac{n}{T_1}; y_2 = \frac{n}{T_2} \right)$; T_1 і T_2 – термін служби базового і нового замка БК, міс.; u'_1, u'_2 – затрати на збірно-розбірні роботи, грн.; K'_2, K'_1 – питомі капітальні вкладення на виготовлення одного замка БК, грн.; N_2 – річна програма зміцнених замків БК, шт.; n – кількість необхідних для вжитку деталей в рік.

Заміна зношених на зміцнені замки БК виконується в процесі ремонту, тому нема додаткових затрат на збірно-розбірні роботи. Використання зміцнених замків БК не потребує супроводжуючих капітальних вкладень, тобто $K'_2 = K'_1$.

Тоді

$$E = \left(\frac{T_2}{T_1} C_1 - C_2 \right) N_2. \quad (5.2)$$

При формуванні зміцненого поверхневого шару базова вартість замка БК збільшується при умові, що матеріал деталі не змінюється:

$$C_2 = C_1 + \Delta C \quad (5.3)$$

Приріст вартості замка БК Δc здійснюється за рахунок додаткових операцій її підготовки, обробці деталі і формування зміцненого поверхневого шару. Дані операції потребують додаткового обладнання, витрат робочого газу, електроенергії, інструменту, затрат на допоміжні матеріали, транспорт і

зарплату персоналу.

Для аналізу допустимих додаткових затрат представимо формулу (5.2) з урахуванням (5.3) у вигляді

$$E = N_2 \left[\frac{T_2}{T_1} - \left(1 + \frac{\Delta C}{C_1} \right) \right] C_1 N_2. \quad (5.4)$$

Таким чином, економічний ефект виражається через збільшення строку служби замка БК і відносне підвищення її вартості за рахунок формування зміцненого поверхневого шару. Тоді позитивний економічний ефект може бути отриманий при умові

$$\frac{\Delta C}{C_1} < \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right). \quad (5.5)$$

З відношення (5.5) слідує, що при двохкратному збільшенні строку служби зміцненого замка БК позитивний економічний ефект досягається, коли збільшення вартості замка БК буде менше початкової його вартості без зміцненого поверхневого шару. Таким чином, рівняння (5.5) дає першу вимогу при виборі деталей окрім замків БК для ІВГТЦПА з розрахунку їх початкової вартості і затрат на технологічний процес.

Менш досконала технологія для отримання заданого ефекту потребує деталей з більш високою початковою відносною вартістю. Таким чином, щоб залучити до виробництва широку номенклатуру деталей з відносно не великою початковою вартістю, необхідно розробити більш досконалу автоматизовану технологію, яка дозволить підвищити термін служби деталі. Це найбільш перспективний шлях. Знизити абсолютну вартість формування зміцненого поверхневого шару у порівнянні з існуючою технологією важче, так як її зміна належить від вартості робочого газу і витратних матеріалів, обладнання, його продуктивності, зарплати обслуговуючого персоналу.

Більш точним критерієм при виборі деталей для азотування можна отримати, переходячи від економічного ефекту до економічної ефективності.

Річну економічну ефективність ІВГТЦПА можна виразити через економічний ефект по формулі (5.2) і затрати на процес ІВГТЦПА по (5.3):

$$E_e = \frac{E}{C_2 - C_1} N_2 = \frac{\left(C_1 \frac{T_2}{T_1} - C_2 \right) N_2}{C_2 - C_1} N_2. \quad (5.6)$$

Приймаючи до уваги співвідношення (5.3) і (5.4), отримаємо

$$E_e = \frac{\left[\frac{T_2}{T_1} - \left(1 + \frac{\Delta C}{C_1} \right) \right]}{\Delta C N_2} C_1 N_2. \quad (5.7)$$

Перетворимо формулу (5.7), помноживши обидві її частини на $\Delta C / c_1$:

$$E_e \frac{\Delta C}{C_1} = \frac{T_2}{T_1} - \left(1 + \frac{\Delta C}{C_1} \right). \quad (5.8)$$

З допомогою виразу (5.8) при заданій економічній ефективності для технології з відомим значенням збільшення строку служби замка БК можна розрахувати допустимий відносний приріст її початкової вартості при використанні ІВГТЦПА.

Для вже розробленого технологічного процесу можна порахувати абсолютні затрати на ІВГТЦПА. Тоді виникає інтерес по формулі (5.8) визначити зворотну величину для оцінки вартості деталей, які економічно вигідно обробляти ІВГТЦПА.

Відносна початкова базова вартість деталі, в затратах на використання ІВГТЦПА, визначається наступним чином:

$$\frac{\Delta C}{C_1} = \frac{E_e - 1}{\frac{T_2}{T_1} - 1}. \quad (5.9)$$

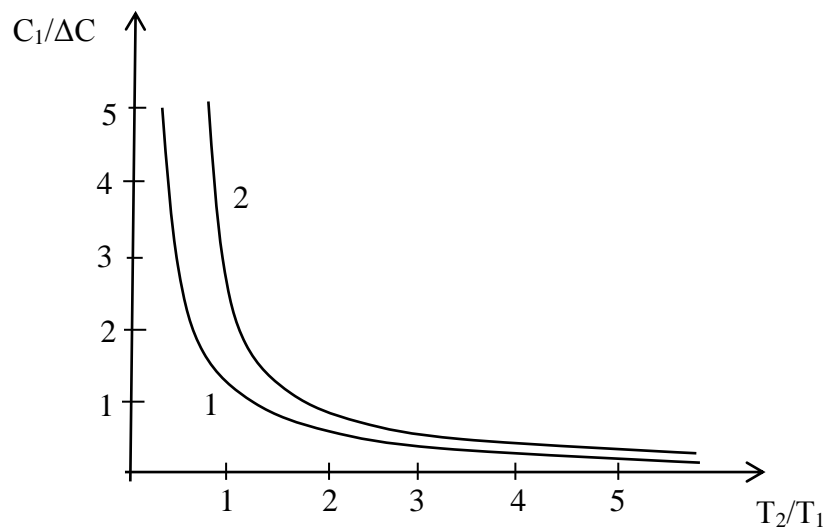
Розраховані по (5.9) залежності свідчать про те, що можливий діапазон використання деталей ІВГТЦПА з метою їх зміцнення обмежений відносною

вартістю, яка дозволяє досягти відповідної якості деталі, що характеризується збільшенням строку її служби. Задаючи необхідну ефективність, можна визначити, до якої мінімальної відносної вартості доцільно використовувати деталі при зміцненні ІВГТЦПА.

Використовуючи аналогічний підхід при приймаючи до уваги, що вартість зношеної деталі визначається вартістю металолому, для процесу відновлення отримуємо

$$\frac{C_1}{\Delta C} = \frac{E_e + 1}{\frac{T_2}{T_1} + E_e} . \quad (5.10)$$

Зміна нижньої межі відносно вартості деталі, які можна обробляти ІВГТЦПА з метою їх зміцнення, показано на рис. 5.3.



1) при зміцненні і 2) при відновленні.

Рисунок 5.3 – Залежність нижньої межі відносно вартості $C_1/\Delta C$ замка БК від збільшення строку служби T_2/T_1

Крива 1 обмежує область значень відносно збільшення терміну служби замків БК, нижче яких економічно доцільно використовувати технологію ІВГТЦПА для зміцнення, а крива 2 – для зміцнення замків БК при заданому значенні вартості базової деталі і відомих затратах на ІВГТЦПА.

При розробці технології ІВГТЦПА по формулі (5.10) для ЗРЗ БК можна оцінити граничне значення затрат при реальному збільшенні строку служби зміцненої ІВГТЦПА (додаток Б).

Таким чином, запропоновано підхід щодо розробки методики визначення нижньої межі вартості зміцнених замків БК ІВГТЦПА [210].

Висновки до розділу 5

1. Теоретичне обґрунтування й узагальнення результатів експериментальних досліджень механічних властивостей зміцнених поверхневих шарів ІВГТЦПА є науковою базою щодо підвищення працездатності ЗРЗ БК на етапах розробки, виробництва, експлуатації та ремонту, а отримані при цьому результати складають основу, розроблених особисто автором наукових результатів, які є рішенням поставленого у роботі актуального наукового завдання.

2. Розвинута в дисертації методика наукових досліджень є основою для розробки принципу управління характеристиками міцності та зносо- і корозійної стійкості ЗРЗ БК із зміцненим поверхневим шаром ІВГТЦПА стосовно до різноманітних умов експлуатації. Підвищення властивостей зміцненого захисного шару здійснюється на базі розроблених теоретичних й технологічних основ шляхом направленою регулювання вивчених факторів на етапах оптимізації технологічного процесу їх формування.

3. На основі отриманих експериментальних результатів значень характеристик міцності та зносо- і корозійної стійкості, проведено багатокритеріальну оптимізацію технологічного процесу ІВГТЦПА та визначено оптимальні параметри процесу.

4. Встановлено підвищення середнього технічного ресурсу зміцнених ІВГТЦПА зразків в 2,47 рази у порівнянні без зміцнення.

5. Достовірність результатів підтверджується коректністю використання математичного апарату й задовільним збігом розрахункових та

експериментальних даних, використанням сучасних фізико-хімічних методів аналізу та деклараційними патентами.

6. Показано, що технологічний процес ІВГТЦПА дозволяє отримати завчасно прогнозовані властивості, які відповідають умовам експлуатації замків БК.

7. Доведено, що технологічний процес ІВГТЦПА зумовлює значний економічний ефект не тільки за рахунок економії матеріалів, але і за рахунок скорочення простоїв, затрат на обслуговування і додатковий ремонт. Їх упровадження дозволяє з науковою обґрунтованістю та високою техніко-економічною ефективністю вирішувати проблему підвищення довговічності ЗРЗ БК при одночасному запобіганні ускладнень і аварій при бурінні свердловин.

8. Викладені узагальнення теоретичних та прикладних результатів показують основні перспективні напрямки наукових та експериментальних пошуків, що пов'язані з подальшим удосконаленням технологічного процесу ІВГТЦПА та управлінням їх властивостями у залежності від умов експлуатації ЗРЗ БК. Основний вплив на розвиток науки здійснюють вимоги практики з першочерговими задачами, від вирішення яких залежить прогрес у галузі створення та використання іонно-плазмової технології, а саме: автоматизація та регулювання технологічним процесом формування зміцненого поверхневого шару й дослідження закономірностей впливу його параметрів на його властивості, науково-обґрунтованого підходу щодо вибору та розробки структури дифузійного шару у зв'язку із умовами експлуатації.

9. 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.

10. 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 методіку 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, що дозволить запобігти ускладненням і аваріям пори 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 із 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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. – Іваноно-Франківськ: “ФАКЕЛ” 2014. – №1(50). – С. 44-50.
2. Быков И. Ю. Эксплуатационная надежность и работоспособность нефтегазопромысловых и буровых машин: учебное пособие / И. Ю. Быков, Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТГ, 2010. – 304 с.
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. Горно-металургическая компания «АСТ-ИНВЕСТ», ООО [Электронный ресурс] / сайт allbiz. – allbiz, [2015]. Режим доступа: <http://www.pervouralsk.all.biz/ast-invest-ooo-e101706>, вільний. – Загл. з екрану. (03.10.2015).
5. Быков И. Ю. Методики проведения лабораторных исследований износостойкости при трении моделей резьбовых соединений бурильной колонны / И. Ю. Быков, Д. В. Кузьминых, В. И. Семин // Сборник научных трудов [Текст]: материалы научно-технической конференции (14-17 апреля 2009 г.): в 2 ч.; ч.1 под. ред. Н.Д.. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 106–109.
6. Семин В. И. Создание централизованной системы качества калибров для резьбовых соединений труб нефтяного сортамента / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО

“ВНИОЭНГ” 2004. – №6. – С. 6–8.

7. Семин В. И. Экспериментальные исследования замковых соединений с изношенной резьбой на усталость и статическую прочность / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №6. – С. 8–11.

8. Семин В. И. Оперативный контроль степени износа резьбы, и отрицательного натяга замкового соединения / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №6. – С. 11–14.

9. Газанчан Ю. И. Повышение сопротивления усталости замковых резьбовых соединений утяжеленных буровых труб большого диаметра / Ю. И. Газанчан, В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №6. – С. 15–17.

10. Семин В. И. Аналитическая оценка статической прочности замкового соединения с изношенной резьбой / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №6. – С. 17–20.

11. Семин В. И. Определение ресурса замкового резьбового соединения при многократном свинчивании / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №12. – С. 11–12.

12. Семин В. И. Противозадирное медьсодержащее покрытие замковой резьбы буровых труб / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2004. – №12. – С. 18–19.

13. Семин В. И. Оптимизация технологии упрочнения замковой резьбы методом поверхностно-пластического деформирования / В. И. Семин // НТЖ. Строительство, нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2005. – №1. – С. 23–27.

14. Семин В. И. Проектирование высокогерметичных резьбовых

соединений обсадных и насосно-компрессорных труб с помощью конечно-элементного анализа / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2005. – №2. – С. 25–29.

15. Семин В. И. Анализ герметичности замкового соединения при статическом нагружении с учетом степени износа резьбы / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2005. – №4. – С. 13–18.

16. Семин В. И. Предельная осевая растягивающая нагрузка на бурильный замок из условия герметичности соединения / В. И. Семин // НТЖ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО “ВНИОЭНГ” 2005. – №6. – С. 19–21.

17. Сароян А. Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. – М.: Недра, 1979. – 231 с.

18. Кузьминых Д. В. Совершенствование методов повышения долговечности замкового соединения бурильной колонны при многократном свинчивании [Текст] : дис. канд. тех. наук: 05.12.13 : защит. 21.10.11 / утвержденная 15.02.11 / Кузьминых Дмитрий Владимирович. – У., 2011. – 125 с.

19. Айзупе Э.А. Измеритель напряжений в бурильных трубах при роторном бурении / Э.А. Айзупе // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т разработки и эксплуатации нефтепромысловых труб, Куйбышев, 1978, вып. 10, Нефтепромысловые трубы. – С. 35-37.

20. Керимов З. Г., Определение долговечности бурильных труб по критерию циклической прочности с учетом нагрузок при спуско-подъемных операциях / З. Г. Керимов, В. Е. Гнилке, П. М. Мамедова // Изв. вуз. “Нефть и газ” , 1977. – №3. – С. 101–106.

21. Козаченко Н.Е. Вопросы надежности бурильных колонн / Н. Е. Козаченко// Обзор инф. – М.: ВИЭМС. – 1978. – 54 с.

22. Лачинян. Л.А. О влиянии переменного кручения на сопротивление

усталости бурильной колонны / Л. А. Лачинян // РНТС “Машины и нефт. оборудование”, 1981. – №6. – С. 27–29.

23. Лачинян Л.А. Работа бурильной колонны / Л. А. Лачинян. – М.: Недра, 1979.– 207 с.

24. Сароян А. Е. Теория и практика работы бурильной колонны / А. Е. Сароян– М.: Недра, 1990. – 236 с.

25. Султанов Б. З. Работа бурильной колонны в скважине / Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгужин, Н. Х. Шаммасов. – М.: Недра, 1973. – 216 с.

26. Крижанівський Є. І. Особливості деформування текстурованої сталі трубопроводу при навантаженні чистим згином / Є. І. Крижанівський, Л. Я. Побережний // Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. – 2001. – № 1. – С. 57–61.

27. Давыдов Г. А. Исследования и разработка методов повышения износостойкости резьбы замков для геологоразведочных бурильных труб: дис. к-та техн. наук: 1973 / Г. А. Давыдов. – М.: МГРИ, 1973. – 238 с.

28. Расулов Н. М., Ярошевский Ф.М. Влияние отклонений параметров на износостойкость замковых резьб / Н. М. Расулов, Ф. М. Ярошевский // Азерб. нефт. х-во. – 1975. – №6. С. 47–51.

29. Сароян А. Е. Проектирование бурильных колонн / А. Е. Сароян, Р. Н. Коган. – М.: «Недра», 1971. – 184 с.

30. Сароян А.Е. Статистическая оценка износа замкового соединения бурильных колонн / А. Е. Сароян, Р. Н. Коган // Нефт. х-во. – 1971. – №8. – С. 10–14.

31. Сароян А.Е. Механизм и критерий износа замковых соединений бурильной колонны / А. Е.Сароян // Азерб. нефт. х-во. – 1984. – №4. – С. 35–47.

32. Щербюк Н.Д. Износостойкость резьбы турбобура ТС5Е-6 5/8 / Н. Д. Щербюк // РНТС, Машины и нефт. Оборудование. – 1971. – №10. – С. 28–30.

33. Щербюк Н. Д. Пути повышения износостойкости замковых резьбовых соединений / Н. Д. Щербюк, И. А. Пейсахова // РНТС, Машины и

нефт. оборуд. – 1975. – №12. – С. 18–20.

34. Папшев Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев – М.: Машиностроение, 1968. – 132 с.

35. Вадецкий Ю. В Бурение нефтяных и газовых скважин / Ю. В. Вадецкий – М.: Недра, 1978. – 471 с.

36. Середа Н. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин / Н. Г. Середа, Е. М. Соловьев. – М.: Недра, 1974. – 456 с.

37. Карпенко Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Г. В. Карпенко. – К.: Наукова думка, 1976. – 125 с.

38. Пивоваров Э. В. Методика подбора консистентных смазок для осевых опор качения турбобуров / Э. В. Пивоваров // Машины и нефтяное оборудование. – 1979. – №7. – С. 19–21.

39. Костецкий Б. И. Трение, износ и смазка в машинах / Б. И. Костецкий. – К.: Техника, 1970. – 395 с.

40. Проскуров А. П. Исследование и повышение износостойкости долотных сталей при статическом и динамическом нагружении реализацией эффекта избирательного переноса: дис. кандидата технич. наук / А. П. Проскуров. – М.: МГРИ, 1978. – 198 с.

41. Шацберг Р. В. Влияние воды на размещение усталостных повреждений и изменение поверхности в условиях смазки при контакте качения / Р. В. Шацберг, И. М. Фелсен // Проблемы трения и смазки. – 1969. – №2 – С. 101–169.

42. Ляшенко Б. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – №1. – С. 94–104.

43. Мозговой В. Ф. Упрочняющие технологии при производстве деталей ГТД и перспективы их развития / В. Ф. Мозговой, П. Д. Жеманюк // Вестн. Харьков. политехн. ун-та. – 1999. – №62. – С. 55–59.

44. Богуслаев В. А. Прочность деталей ГТД / В. А. Богуслаев, В. Б. Жуков, В. К. Яценко. – З.: ОАО «Мотор Сич», 1999. – 249 с.

45. Богуслаев В. А. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. А. Богуслаев, А. И. Долматов, К. С. Колтун и др. – З.: ОАО «Мотор Сич», 1999. – 249 с.
46. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей / [Новиков Н. В., Бидный А. А., Ляшенко Б. А. и др.]. – К. : АН УССР ИСМ, 1989. – 111 с.
47. Лысенко А. Т. Основы авиационной технологии / А. Т. Лысенко, И. Г. Носовский, Г. Н. Зарубин. – К. : КВИАВУ ВВС, – 1971. – 432 с.
48. Износостойкие материалы в химическом машиностроении: Справочник / под ред. Ю. М. Виноградова. – Л. : Машиностроение, 1977. – С. 126.
49. Костецкий Б. И. Надежность и долговечность машин / Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Бершадский Л. И. – К. : Техніка, 1975. – 408 с.
50. Трибологические свойства покрытий из композиционного материала Ni-MoS₂, полученного электрохимическим способом / D'Agostino V., Palazzo G., Rossi C., Rossi F. // Tribol. E lubric. – 1983. – Vol. 18, № 2. – P. 58–64.
51. Трофимов В. А. Обеспечение надежности и долговечности подвижных сочленений шасси, выполненных из титановых сплавов технологическими методами / В. А. Трофимов, В. М. Бежецкий // Технологические системы. – 2002. – № 5. – С. 56–65.
52. Износостойкие диффузионно-легированные композиционные покрытия / [М. В. Лучка, М. В. Киндрачук, П. И. Мельник и др.]. – К. : Техника, 1993. – 143 с.
53. Киндрачук М. В. Трибологія покриттів матрично-наповненого типу / М. В. Киндрачук, М. В. Лучка, А. О. Корнієнко, Джамаль І. Мансур // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. – К. : Нац. авіац. ун-т. – 2007. – Вип. 48. – С. 127–141.
54. Наземные транспортно-тяговые системы / [под общ. ред. проф. И. П. Ксеновича]. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 3. – 787 с.
55. Хмелевская В. Б. О нанесений покрытий на детали, работающие при

повышенных температурах / В. Б. Хмелевская, М. В. Катаев // *Металлообработка*. – К. : 2004. – № 5. – С. 36–41.

56. Витязь П. А. Повышение качества газотермических покрытий из проволочных материалов / П. А. Витязь, Р. О. Азизов, М. А. Белоцерковский // *Трение и износ*. – К. : 2003. – Т. 24, № 6. – С. 667–669.

57. Исследование возможности применения газодинамического напыления для восстановления деталей авиатехники из сталей / [Юркевич С. П., Прищепов Е. Г., Мухачев О. Г. и др.] // *Металлообработка*. – К. : 2005. – № 5. – С. 24–29.

58. Thermoplastic materials maintain critical properties at all temperatures / *Aviation Mechanics Bulletin Flight Safety Found.* – 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 20.

59. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. 1 / [Богуслаев В.А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.]. – З. : Мотор Сич, 2003. – 396 с.

60. Лазерные и физико-технические методы обработки материалов : материалы конф., 27–29 мая 1997 г. Алушта / [ред. В. С. Коваленко]. – К. : Украинский дом экон. и науч.-техн. знаний, 1997. – 46 с.

61. Юркевич С. П. Исследование лазерной наплавки на опорных поверхностях деталей из стали 30ХГСА / С. П. Юркевич, В. Томашевич // *Металлообработка*. – 2004. – № 4. – С. 38–42.

62. Синяков К. А. Структура и микротвердость инструментальных сталей после лазерной закалки / К. А. Синяков // *Металлообработка*. – 2006. – № 1. – С. 37–40.

63. Шеховцева Е. В. Методы повышения износостойкости зубчатых колес / Е. В. Шеховцева // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2006. – № 4. – С. 51–53.

64. Киричок П. О. Зміцнення поверхонь металевих деталей: навч. посіб. / П. О. Киричок, В. Г. Олійник, Т. Ю Киричок. – К. : Преса України, 2004. – 240 с.

65. Ляшенко Б. А. Тенденция развития упрочняющей поверхностной

обработкой и положение в Украине / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104.

66. Андреев А. А. Осаждение PVD-методами наноструктурных покрытий с высокими механическими параметрами / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. 6-й Междунар. конф. – Х. : ННЦХФТИ : ИПЦ Контраст, 2005. – С. 144–153.

67. Андриевский Р. А. Наноструктурные материалы: учеб. пособие / Р. А. Андриевский, А. В. Рагуля. – М. : Академия, 2003. – 179 с.

68. Інженерія поверхні: підручник / [Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д. та ін.]. – К. : Наукова думка, 2007. – 558 с.

69. Пат. 26227 Україна, МПК (2006) В23Н 9/00, В23Н 5/00. Спосіб електроіскрового зміцнення поверхонь деталей / Мазанко В. Ф., Храновська К. М., Погорелов О. П., Іваненко Є. В., Бевз В. П. ; заявник та патентовласник Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України. – № у 200704832 ; заявл. 03.05.07 ; опубл. 09.10.07, бюл. № 14.

70. Ляхович Л. С. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Л. С. Ляхович. – М. : Metallurgiya, 1981. – 424 с.

71. Исследование свойств металлизации покрытий для восстановления деталей авиатехники из сталей 30ХГСН2А, 30ХГСА / [С. П. Юркевич, Е. Г. Прищепов, А. С. Прядко и др.] // Металлообработка. – 2005. – № 5. – С. 22–24.

72. Баева Л. С. Повышение долговечности деталей машин методом нанесения многокомпонентных защитных диффузионных покрытий / Л. С. Баева, Е. К. Медко // Наука – производству. – 2000. – № 2. – С. 29–31.

73. Эпик А. П. Исследования свойств диффузионных карбидных и боридных покрытий на конструкционных сталях / Эпик А. П., Шавловский Е. Н., Миронов Е. А. [и др.] // Физико-химическая механика материалов. – 1978. – № 5. – С. 67–70.

74. Спиридонова И. М. Циклическое изменение активности

насыщающей среды с целью интенсификации диффузионных процессов при ХТО / И. М. Спиридонова // Роль диффузионных процессов в формировании поверхности металла с особыми свойствами и образовании неразъёмных соединений : тез. докл. семинара, (Киев, 22–23 сент. 1992 г.) / Ин-т металлофизики АН Украины. – К. : Ин-т металлофизики АН Украины, 1992. – С. 15.

75. Мишин В. Н. Исследования износостойкости борированной стали / В. Н. Мишин, Е. В. Шадричев // Доклады 25 научно-технической конференции Северо-Западного заочного политехнического института. – Л., 1981. – С. 40–44.

76. Ясь Д. С. Методи відновлювання та підвищення довговічності деталей машин легкої промисловості: навчальний посібник / Д. С. Ясь – К. : УМК ВО, 1992. – 364 с.

77. Grafen W. Acetylene low-pressure carburizing – a novel and superiority carburizing technology / W. Grafen, B. Edenhofer. // Heat treatment of metals. – 1999. – Vol. 26, № 4. – P. 79–85.

78. Georges J. TC Plasma Nitriding. 12th IFHTSE Melbourne 2000, Australia / J. Georges // Heat Treatment of Metals. – 2001. – № 2. – P. 33–37.

79. Nitriding Technology. Theory and Practice : proceedings of the 9th IFHTSE, Warsaw, Poland. – Warsaw: In-te of Precision mech., 2003. – P. 12–48.

80. Теория и технология азотирования / [Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Шпис Г. И. и др.]. – М. : Metallurgy, 1991. – 320 с.

81. Пастух И. М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем розряде: состояние и перспективы / И. М. Пастух // Проблемы трибології. – 2004. – № 3. – С. 42–55.

82. Елисеев Ю. С. Ионное азотирование при производстве зубчатых передач / Ю. С. Елисеев. // Полет. – 1999. – № 2. – С. 53–55.

83. Азотирование и карбонитрирование : пер. с нем / [Чаттерджи-Фишер Р., Эйзел Ф.В., Хоффман Р. и др.]; под ред. А.В. Супова. – М. : Metallurgy, 1990. – 279 с.

84. Ляшенко Б. А. О достоинствах технологии вакуумного азотирования / Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковский // Оборудование и инструмент. – 2005. – № 12. – С. 20–21.

85. Ляшенко Б. А. Газотермоциклическое ионное азотирование в импульсном режиме поверхностных слоёв стальных деталей газотурбинных двигателей / Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Мирненко В. И., Радько О. В. // Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні : матеріали 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф., (Київ, 29–31 трав. 2007 р.) НАН України, Ін-т пробл. міцності. – К., 2007. – С. 121–122.

86. Котельников Д. И. Сюрпризы плазмы / Д. И. Котельников – К. : Техника, 1990. – 158 с.

87. Бень В. П. Несущая способность материала и конструктивных элементов с покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Владимир Петрович Бень. – К., 2004. – 20 с.

88. Ильин А. А. Низкотемпературное ионное азотирование имплантантов из титанового сплава ВТ-20 в различных структурных состояниях / Ильин А. А., Скворцова С. В., Лукина Е. А. [и др.] // Металлы. – 2005. – № 2. – С. 38–42.

89. Артемьев В. П. Ионное азотирование покрытий, нанесенных из жидкометаллического носителя / В. П. Артемьев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 1. – С. 43–46.

90. Чудина О. В. Азотирование стали, легированной при лазерном нагреве / Чудина О. В. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 1. – С. 35–40.

91. Куост М. Азотирование в плазме деталей из алюминиевых сплавов / М. Куост, Х.-Р. Шток, П. Майр // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 7. – С. 33–39.

92. Nitrieren von Aluminiumwerkstoffen im DC-Plus-Plasma / [Reinhold B., Naumann J., Spies H.-J., Katzer F.] // Harterei-Tech. Mitt. – 1997. – № 6. – С. 350–355.

93. Семон Б. Й. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей з алюмінієвих сплавів військової техніки вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми / Б. Й. Семон, В. І. Мірненко, О. В. Радько // Труды академії : зб. наук. пр. / Нац. акад. оборони України. – 2007. – № 1. – С. 230–236.

94. Ion nitriding of zirconia coated on stainless steel: structure and mechanical properties / [Caruso R., Gomes B., de Sanctis O., Feugeas J.] // Thin Solid Films. – 2004. – № 1–2. – P. 142–148.

95. Новые процессы термической обработки / под. ред. И. М. Неклюдова, В. М. Шулаева. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2004. – 200 с.

96. Носов Г. И. Ионное азотирование быстрорежущей стали в плазме дуги с термокатодом / Г. И. Носов, В. М. Хороших, Н. Е. Калинина // Вакуумные технологии и оборудование. – Х., 2001. – С. 341–364.

97. Андреев А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, Л. П. Саблев, В. М. Шулаев [и др.]. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

98. Хитько А. В. Масляный ампульный полый катод-нейтрализатор / А. В. Хитько, Н. В. Калинина // Проблемы высокотемпературной техники. – 1998. – С. 31–42.

99. Герасимов С. А. Научные основы разработки технологических процессов азотирования конструкционных легированных сталей, обеспечивающих повышение работоспособности изнашивающихся сопряжений машин: дис. ... д-ра техн. наук / Герасимов Сергей Алексеевич. – М., 1997. – 563 л.

100. Солунин М. А. Модифицирование поверхности материалов в импульсной плазме тлеющего разряда / М. А. Солунин // Вестник ИГЭУ. – 2001. – № 2. – С. 67–71.

101. Grün R. Puls-Plasma – Wärmebehandlung zum Oberflächen und Randschichtbehandeln / R. Grün, W. Exner, R. Zeller // Härterei-Tech. Mitt. – 1987. – № 1 – P.42–46.

102. Grün R. Plasma nitriding in industry – problems, new solutions and

limits / R. Grün, H.-J. Günther // *Materials Science and Engineering: A*. – 1991. – № 1 – 2. – P. 435–441.

103. Torkar M. Puls plasma nitriding of stainless steel / M. Torkar, V. Leskovšek, B. Rjazancer // *Kovine zlit. tehnol.* – 1995. – Vol. 29, № 3–4. – P. 413–416.

104. Liang W. Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasma nitriding / W. Liang // *Applied Surface Science*. – 2003. – Vol. 211, № 1–4. – P. 308–314.

105. Моделирование комбинированных процессов химико-термической обработки стали / [Гюлиханданов Е. Л., Анисимов В. С., Росляков И. Н., Хайдоров А. Д.] // *Проблемы кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования: тез. всес. науч.-техн. конф.* / НИИ мат. моделир. при Удмуртском гос. ун-те. – Ижевск, 1990. – С. 55–56.

106. Забелин С. Ф. Об активации и кинетической теории процессов диффузионного насыщения металлов при химико-термоциклической обработке / С. Ф. Забелин // *Материаловедение*. – 2004. – № 7. – С. 17–22.

107. Fedirko V. M. Titan's deformation properties after nitriding by therm cycling / V. M. Fedirko, I. M. Pohreliuk, O. V. Yaskiv // *Metalurgija*. – Zagreb, 1997. – № 2. – P. 83–85.

108. Шашков Д. П. Химико-термическая обработка конструкционных материалов / Д. П. Шашков // *Строительные и дорожные машины*. – 2001. – № 7. – С. 41–42.

109. Gomes G. Alternated high- and low-pressure nitriding of austenitic stainless steel: Mechanisms and results / G. Gomes, M. Ueda, H. Reuther // *Applied Physics*. – 2003. – Vol. 94, № 8. – P. 5379–5383.

110. Ионное азотирование феррито-перлитной и аустенитной сталей в газовых разрядах низкого давления / А. Д. Коротаев, С. В. Овчинников, А. Н. Тюменцев [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. – 2004. – № 1. – С. 22–27.

111. Белашова И. С. Газотермоциклический метод регулируемых

процессов азотирования / И. С. Белашова // Технология машиностроения. – 2004. – № 5. – С. 11–14.

112. Формування зносостійких нітридних шарів при комбінованому азотуванні / І. М. Погрелюк, О. І. Яськів, І. М. Пастух [та ін.] // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2006. – № 4. – С. 113–116.

113. Ахтизарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие [для студ. хим.-технол. вузов] / С. Л. Ахтизарова, В. В. Кафаров. — [2-е изд.]. — М. : Высш. шк., 1985. — 337 с.

114. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине: пер. с англ. / Винер Н. ; под ред. Г. Н. Поварова. — [2-е изд.]. — М.: Наука, 1983. — 343 с.

115. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техніка, 1975. – 168 с.

116. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 430 с.

117. Барабашук В. И. Планирование эксперимента в технике / Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. — К. : Техніка, 1984. — 200 с.

118. Толбатов Ю. А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах : навч. посіб. / Ю. А. Толбатов. — К. : Вища школа, 1994. — 399 с.

119. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. — М. : Наука, 1971. — 207 с.

120. Лапач С. Н. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка / Лапач С. Н., Пасечник М. Ф., Чубенко А. В. — К. : Укрспецмонтажпроект, 1999. — 312 с.

121. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С. Г. Радченко. — К. : Укрспецмонтажпроект, 1998. — 274 с.

122. Радченко С. Г. Методология создания новой техники и

технологий / С. Г. Радченко, С. Н. Лапач // Технологические системы. — 2003. — № 1. — С. 41—44.

123. Радченко С. Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навчальний посібник / С. Г. Радченко. — К. : Політехніка, 2001. — 88 с.

124. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. — М.: Металлургия, 1969. — 158 с.

125. Математическая теория планирования эксперимента / [С. М. Ермаков, В. З. Бродский, А. А. Жиглявский и др.]. — М.: Наука, 1983. — 392 с.

126. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. — М. : Наука, 1981. — 111 с

127. Лапач С. Н. Пакет прикладных программ ПРИАМ : информ. листок о науч.-техн. достижении № 88—007 / С. Н. Лапач, С. Г. Радченко, Н. И. Литвинчук — К. : УкрНИИИТИ, 1988. — 4 с.

128. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ : каталог / НТУ КПИ ; под ред. Лапач С. Н., Радченко С. Г., Бабич П. Н. — К. : Текпор, 1993. — С. 24—27.

129. Иванов Г.А. Статистические методы восстановления истинной зависимости по экспериментальным данным / Г. А. Иванов, А. Ф. Турбан. — К.: Знание, 1986. — 22 с.

130. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. — М.: Лег. Индустрия, 1974. — 262 с.

131. Лапач С. Н. Статистические методы в медикобиологических исследованиях с использованием Excel / С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич. — К.: МОРИОН, 2000. — 320 с.

132. Большев Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. — [3-е изд.]. — М. : Наука, 1983. — 416 с.

133. Подиновский В.Д., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. Д. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
134. Жиглявский А. А. Методы поиска глобального экстремума / А. А. Жиглявский, А. Г. Жилинскас. — М. : Наука, 1991. — 248 с.
135. Дегтярев Ю. И. Методы оптимизации: Учебное пособие / Ю. И. Дегтярев. – М.: Советское радио, 1980. – 272 с.
136. Радченко С. Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей / С. Г. Радченко. — К. : Санспарель, 2005. — 504 с.
137. Шмырев В.Ф., Кондращенко В.Я., Радченко С.Г. Метод оптимизации массовых характеристик воздушных распределительных сетей бортовых энергетических систем // Зб. наук. праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці. – К.: Світ, 1998. – Вип. 4. – С. 28–38.
138. Трапезон О. Г., Мірненко В.І., Бондар А.В. Установка для дослідження матеріалів з покриттями на термомеханічну втому / О. Г. Трапезон, В. І. Мірненко, А. В. Бондар // Зб. наук. пр. ННДЦ ОТ і ВБ України. – К.: ННДЦ ОТ і ВБ України. – 2003. – №20. – С. 101–105.
139. Труды научно-технического совещания по изучению рассеяния энергии при колебаниях упругих тел / М. М. Писаревский. – Киев: Изд-во АН УССР. – 1968. – С. 54–89.
140. Серенсен С. В. Динамика машин для испытаний на усталость / М. Э. Гарф, В. А. Кузьменко. – М.: Машиностроение, 1967. – 460 с.
141. Копылов А. А. Виброгазообразивная износостойкость компрессорных лопаток турбин / А. А. Копылов, Ю. Г. Векслер // Защита металлов. – 2000. – том 36, № 2. – С. 215–217.
142. Крайдер К. Г. Введение в композиционные материалы с металлической матрицей / К. Г. Крайдер // Композиционные материалы с металлической матрицей. Т.4. – М.: Машиностроение, 1978. – 504 с.
143. Антонюк В. С. Розробка основ аналітичного розрахунку пружних систем з покриттями на базі вибраних задач механіки і теорії коливань / В.

С. Антонюк, О. Г. Трапезон, В. І. Мірненко, А. В. Рутковський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ. – 2004. – №4(31). – С. 5–10.

144. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко. – Киев: Вища школа, 1973. – 672 с.

145. Ляшенко Б. А. Методика та результати прискороного визначення циклічної міцності титану з тонкоплівковими покриттями / Б. А. Ляшенко, В. В. Єрмолаєв, В. І. Мірненко, А. В. Рутковський, А. В. Бондар // Труды Академії. – К.: НАОУ. – 2003. – №43. – С. 335–344. – Таємно, інв. № 39425.

146. Трапезон О.Г., Мірненко В.І., Бондар А.В. Методика дослідження матеріалів з покриттями на втому за допомогою високочастотної установки прискореними термомеханічними випробуваннями / О. Г. Трапезон, В. І. Мірненко, А. В. Бондар // Зб. наук. пр. ННДЦ ОТ і ВБ України. – К.: ННДЦ ОТ і ВБ України. – 2004. – №22 (2). – С. 123–128. – Таємно, інв. № 3399.

147. Трапезон А.Г., Ляшенко Б.А., Рутковський А.В. О влиянии покрытий на сопротивление усталости технического титана / А. Г. Трапезон, Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковський // Проблемы прочности. – 1995. – №11–12. – С. 32–40.

148. Трапезон А. Г. К методике ускоренной оценки усталости металлов с упрочняющими покрытиями / А. Г. Трапезон // Проблемы прочности. – 2009. – №2. – С. 79–90.

149. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с.

150. Пат. 24695 Україна МПК (2206) G01N3/56. Машина тертя / Скуратовський А. К. ; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u 2007 02330 ; заявл. 03.03.2007 ; опубл. 10.07.2007, бюл. № 10.

151. Скуратовський А. К. Збільшення ресурсних показників сталевих деталей машин через застосування енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення / А. К. Скуратовський, О. В. Радько, Б. А. Ляшенко//

Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2010. № 1. – С. 115-119.

152. Тушинский Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов. – Новосибирск. : Наука, 1986. – 200 с.

153. Северинчик Н. А., Долговечность и надежность геологоразведочных бурильных труб / Н. А. Северинчик, Б. В. Копей. – М., "Недра", 1979, - 176 с.

154. Северинчик Н. А. Коррозия и коррозионная усталость подземного бурового оборудования / Н. А. Северинчик, О. Т. Масник, Б. В. Копей. – Львов., “Вища школа”, издательство при Львовском госуниверситете, 1981, - 144с.

155. Глоба О. В. Вимірювальна система по визначенню параметрів шорсткості поверхні / О. В. Глоба, С. В. Майданюк, О. А. Плівак // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". – К. : Машиностроение, 2001. – № 41. – С. 91–94.

156. Русаков А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 480с.

157. Горелик С. С. Рентгенографический и электроннооптический анализ: учеб. пособие / С. С. Горелик, Расторгуев, Ю. А. Скаков – [3-е изд.]. – М. : МИСИС, 1994 – 328 с.

158. Васильев Д. М. Современное состояние рентгенографического способа определения макронапряжений / Д. М. Васильев, Б. Б. Трофимов // Заводская лаборатория. – К. : Машиностроение, 1984 – № 7. – С.20–29.

159. Осадчий Н. В. Конечно-элементное моделирование фланцевого соединения с контактирующими круговыми фланцами. Сопоставление результатов конечно-элементного расчета с результатами экспериментального исследования / Н. В. Осадчий // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – С.33 – 40.

160. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.

161. ANSYS в примерах задачах / Басов К. А. [Под общ. Ред. Д.Г. Красковского]. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.: ил.
162. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows / Шимкович Д. Г. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
163. Гуд Г. Х. Системотехника / Г. Х. Гуд, Р. Э. Маком – М.: Советское радио, 1962. – 383 с.
164. Дубровська Г. М. Системи сучасних технологій / Г. М. Дубровська. – Ч.: ЧІТІ, 2001. – 195 с.
165. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 283 с.
166. Скляр Н. М. Конструктивная прочность металлов / Н. М. Скляр // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1981. – №6. – С. 8–12.
167. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Часть 1 / Трощенко В. Т., Красовский А. Я., Покровский В. В. [и др.] – К.: Наукова думка, 1994. – 286 с.
168. Сопротивление материалов / Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. [и др.] – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.
169. Тайра С. Теория высокотемпературной прочности материалов: Пер. с япон / С. Тайра, Р. Отани. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
170. Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Г. Н. Третьяченко, Л. В. Кравчук, Р. И. Куриат [и др.]. – К.: Наукова думка, 1985. – 280 с.
171. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Часть 2 / В. Т. Трощенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский [и др.]. – К.: Наукова думка, 1993. – 702 с.
172. Петухов А. Н. О необходимости регламентирования свойств поверхностного слоя при проектировании деталей ГТД с учетом усталости / Петухов А. Н. // Техника воздушного флота. – 1995. – 69, №1–2. – С. 74–77.

173. Масленков С. Б., Ларкин В. А., Жебынева Н. Ф. Влияние режимов горячей пластической деформации на структуру и свойства штампованных заготовок для лопаток газотурбинных двигателей / С. Б. Масленков, В. А. Ларкин, Н. Ф. Жебынева // *Металловед. и терм. обраб. мет.* – 1995. – №1. – С. 27–39.

174. Fatigue life prediction – a somewhat optimistic view of the problem / Schütz W. // *Aluminium.* – 1974. – №5. – P. 350–355.

175. Налимов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – М.: Наука, 1976. – 128 с.

176. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

177. В. В. Федоров Теория оптимального эксперимента / В. В. Федоров. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

178. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис и др. – М.: Металлургия, 1991 – С. 88.

179. Пат. 10014 Україна, МПК 7 С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б. А., Рутковський А. В., Мірненко В. І., Радько О. В. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.

180. Пастух И. М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы / И.М. Пастух // *Проблемы трибології.* – 2004. – № 3. – С. 42 – 55.

181. Солунин М. А. Модифицирование поверхности материалов в импульсной плазме тлеющего разряда / М. А. Солунин // *Вестник ИГЭУ.* – 2001. – № 2. – С. 67 – 71.

182. Liang W. Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasma nitriding / W. Liang // *Applied Surface Science.* – 2003. – Vol. 211, № 1–4. – P. 308–314.

183. Забелин С. Ф. Об активации и кинетической теории процессов диффузионного насыщения металлов при химико-термоциклической

обработке / С. Ф. Забелин // *Материаловедение*. – 2004. – № 7. – С. 17 – 22.

184. Шашков Д. П. Химико-термическая обработка конструкционных материалов / Д. П. Шашков // *Строительные и дорожные машины*. – 2001. – № 7. – С. 41–42.

185. Белашова И. С. Газотермоциклический метод регулируемых процессов азотирования / И. С. Белашова // *Технология машиностроения*. – 2004. – № 5. – С. 11–14.

186. Формування зносостійких нітридних шарів при комбінованому азотуванні / І. М. Погрелюк, О. І. Яськів, І. М. Пастух [та ін.] // *Проблеми трибології*. – 2006. – № 4. – С. 113 – 116.

187. Термическая обработка в машиностроении: справочник / [под ред. Лахтина Ю. М.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

188. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М.: Металлургия, 1991 – 320 с.

189. Edenhofer В. Physikalische and metallkundliche / В. Edenhofer // *Harterei – Technische Mitteilungen*. – 1974. Vj. Bd 29, № 2. – p. 105-112.

190. Арзамосов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамосов, А. Г. Братухин [и др.]. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 1999. – 400 с.

191. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис [и др.]. – М. : Металлургия, 1991. – 320 с.

192. Sun Y. Plasma surface engineering of low alloy steel / Y. Sun and T. Bell // *Materials Science and Engineering*. – 1991. – Vol. A 140. – P. 419–434.

193. Павлов В. Ф. Связь остаточных напряжений и предела выносливости упрочненных деталей различного диаметра / В. А. Кирпичёв, В. П. Сазанов [и др.]: Проблемы динаміки і міцності в газотурбобудуванні : тези доп. 3-ї Міжнар. наук.-техніч. конф., (Київ, 29–31 трав. 2007 р.) – К. : НАН України, Ін-т пробл. міцності, 2007. – С. 149–150.

194. Barrallier L. Residual stress analysis in nitrated layers. A comparison between the X-ray diffraction technique and a thin plate deflection method / L.

Barrallier, J. Barralis, J. Frey // Bull. Cercle etud. metaux. – 1993. – Vol. 16, № 7. – P.4.1–4.12.

195. Рутковський А. В. Характеристики матеріалів авіаційної техніки після газотермоциклічного іонного азотування / А. В. Рутковський, О. Б. Сорока, А. К. Скуратовський, О. В. Радько // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. нац. авіац. ун-т. – 2007. – Вип. 48. – С. 101–110.

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

197. 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, 5—7 лист. 2012 р.) / ІФНТУНГ — ІФ., 2012. — С. 259-262.

198. 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.

199. 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.

200. Металоведение / под. ред. Б. Н. Арзамасова.– М. : изд. Машиностроение, 1986. – 384 с.

201. 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.

202. 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.

203. 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.

204. 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.

205. 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.

206. 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. – Іваноно-Франківськ: ФАКЕЛ 2014. – №2(22). – С. 44-50.

207. 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.

208. 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. – Іваноно-Франківськ: ФАКЕЛ 2014. – №4(53). – С. 38-47.

209. Мирненко В. И. 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.

210. 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.

211. 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.) / ІФНТУНГ — ІФ., 2016. — С. 312-314.

РОЗРАХУНОК

економічної ефективності від упровадження технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильних колон

Постановка задачі та її мета. Розрахувати річний економічний ефект від упровадження технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильних колон.

Джерела утворення економічного ефекту. Упровадження технологічного процесу імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильних колон дозволяє підвищити їхній ресурс в 2 рази.

Частина собівартості, що змінюється, і річного обсягу продукції включає:

1. Витрати на заробітну плату робітників.
2. Витрати на амортизацію устаткування.
3. Витрати на рухову енергію.
4. Витрати на інструмент.
5. Витрати на робочі гази.
6. Витрати на допоміжний матеріал.

Основні вихідні дані:

За одиницю продукції прийнято замки бурильних труб:

ЗН-172 – вартість С1 = 4290 грн./од.;

ЗН-140 – вартість С1 = 3510 грн./од.;

ЗН - 108 – вартість С1 = 3315 грн./од.;

ЗН – 95 – вартість С1 = 2700 грн./од.;

З – 50 – вартість С1 = 1650 грн./од.;

- річна норма робочого часу при роботі в одну зміну $T = 1920$ годин;
- річна норма амортизаційних відрахувань від вартості устаткування $a_0 = 0,046$;

- погодинна заробітна плата оператора $Z_p = 18,75$ грн.;
- вартість 1 кВт електроенергії $C_e = 0,99$ грн.;
- вартість робочих газів на одну операцію $C_i = 92$ грн.;
- вартість 1 одиниці установки $C_y = 50000$ грн.;
- норма витрати електроенергії на одну годину $N_e = 20$ кВт;
- річна програма зміцнення замків:

ЗН-172 – $N_2 = 1440$ шт.;

ЗН-140 – $N_2 = 1920$ шт.;

ЗН - 108 – $N_2 = 2400$ шт.;

ЗН – 95 – $N_2 = 2880$ шт.;

З – 50 – $N_2 = 9600$ шт.;

(визначається в залежності від кількості ЗРЗ, які можуть поміститися одночасно в установці ВПА-1: ЗН-172 – $N_1 = 3$ шт; ЗН-140 – $N_1 = 4$ шт; ЗН-108 – $N_1 = 5$ шт; ЗН-95 – $N_1 = 6$ шт; З-50 – $N_1 = 10$ шт.);

- тривалість однієї операції зміцнення ЗРЗ БК $t = 3$ год.;
- кількість операцій на день при зміцненні замків БТ на день $S = 2$ опер.;
- кількість робочого персоналу, який працює на одній установці $P = 2$ чол.;

- додаткові витрати на допоміжні матеріали $V = 36000$ грн./рік;
- термін служби базового замка $T_1 = 0,5$ міс.;
- термін служби зміцненого замка $T_1 = 1$ міс.;
- необхідна кількість замків на рік $n = 2000$ шт.

Розрахунок економічного ефекту.

1. Розрахунок вартості однієї операції зміцнення замка БТ:

$$B_0 = N_e \cdot C_e \cdot t + t \cdot Z_p \cdot P + C_y \cdot a_0 \cdot t / T + C_i + (V / T) \cdot t$$

$$B_0 = 20 \cdot 0,99 \cdot 3 + 3 \cdot 18,75 \cdot 2 + 50\,000 \cdot 0,046 \cdot 3 / 1920 + 92 + (36000 / 1920) \cdot 3$$

$$= 323,4 \text{ грн.}$$

2. Розрахунок вартості зміцнення одного замка БТ:

$$\Delta C = B_0 / N_1:$$

Визначаємо вартість зміцнення для кожного типу замків БТ:

$$\text{ЗН-172 } \Delta c = 323,4 / 3 = 108 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-140 } \Delta c = 323,7 / 4 = 81 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-108 } \Delta c = 323,7 / 5 = 65 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-95 } \Delta c = 323,7 / 6 = 54 \text{ грн.};$$

$$\text{З-50 } \Delta c = 323,7 / 10 = 32,4 \text{ грн.}$$

3. Розрахунок вартості зміцненого замка БТ:

$$C2 = C1 + \Delta C:$$

$$\text{ЗН-172 } C2 = 108 + 4290 = 4384,7 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-140 } C2 = 81 + 3510 = 3581 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-108 } C2 = 65 + 3315 = 3371,8 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-95 } C2 = 54 + 2700 = 2747,4 \text{ грн.};$$

$$\text{З-50 } C2 = 32,4 + 1650 = 1678,4 \text{ грн.}$$

4. Розрахунок річного економічного ефекту:

$$E = \left[\frac{T2}{T1} - \left(1 + \frac{\Delta C}{C1} \right) \right] \cdot C1 \cdot N2:$$

Розраховуємо для кожного типу замків БК:

$$\text{ЗН-172 - } E = \left[\frac{1}{0,5} - \left(1 + \frac{108}{4290} \right) \right] \cdot 4290 \cdot 1440 = 6022080 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-140 - } E = \left[\frac{1}{0,5} - \left(1 + \frac{81}{3510} \right) \right] \cdot 3510 \cdot 1920 = 6583680 \text{ грн.};$$


$$\text{ЗН-108 - } E = \left[\frac{1}{0,5} - \left(1 + \frac{65}{3315} \right) \right] \cdot 3315 \cdot 2400 = 7800000 \text{ грн.};$$

$$\text{ЗН-95} - E = \left[\frac{1}{0,5} - \left(1 + \frac{54}{2700} \right) \right] \cdot 2700 \cdot 2880 = 82000000 \text{ грн.};$$

$$\text{З-50} - E = \left[\frac{1}{0,5} - \left(1 + \frac{32,4}{1650} \right) \right] \cdot 1650 \cdot 9600 = 15528960 \text{ грн.}$$

Таким чином застосування методу ІВГТЦПА для зміцнення замків БК дає можливість досягти економічний ефект від 6 до 15,5 млн. грн. на рік в залежності від геометричних розмірів замків БТ та вакуумної камери (при використанні однієї установки).

ЗАТВЕРДЖУЮ
ПрАТ «Газінвест»


І.М. Вінтонюк
“11” грудня 2015 року

АКТ

про реалізацію результатів наукового дослідження
здобувача Національного технічного університету нафти і газу
Ткача Миколи Ярославовича

Комісія у складі: голови – технічного директора ПрАТ «Газінвест» Красівського Тараса Михайловича, та членів комісії: заступника голови правління ПрАТ «Газінвест» Лесюка Тараса Богдановича), супервайзера ПрАТ «Газінвест» Березовського Ігоря Григоровича, бурового майстра ДП «Західукргеологія» Гетьманського Сергія Анатолієвича.

Розглянула можливість практичного застосування зміцнених замкових різьбових з'єднань бурильної колони методикою імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування яка підтверджується патентом України на корисну модель № 91096 від 25.06.2014р., в основі якого лежить утворення зміцнених поверхневих шарів замкових різьбових з'єднань бурильної колони шляхом концентрованого насичення поверхні деталей азотом в імпульсному режимі.

Комісія встановила:

зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильної колони імпульсним вакуумним газотермоциклічним іонно-плазмовим азотуванням, надає можливість підвищити їхню працездатність, за рахунок покращення міцнісних характеристик, підвищення зносостійкості і корозійної стійкості, підвищити рівноресурсність елементів бурильної колони, що призводить до зниження аварій і ускладнень при бурінні свердловин.

Висновок: вважати використання методики імпульсного вакуумного газотермоциклічного іонно-плазмового азотування для зміцнення замкових різьбових з'єднань бурильної колони реалізованою в практичній діяльності ПрАТ «Газінвест»

Голова комісії: Красівський Т.М.

Члени комісії: Лесюк Т.Б.

Березовський І.Г.,

Гетьманський С.А.

