

## ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

М.Є. Чернова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,  
e-mail: physics@nung.edu.ua

Суттєвою проблемою нафтогазової промисловості є втомно-корозійне руйнування елементів бурильної колони та прихоплення бурильних, обважнених труб в свердловині, які виникають у процесі буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин. Причиною прихоплення є тертя, що виникає між стінками стовбура свердловини та елементами бурильної колони. Явище тертя перешкоджає забезпеченню цілісності керна у керноприймальному пристрої.

Розглядається можливість подолання цих проблем за рахунок застосування полімерно-композиційних матеріалів для оброблення поверхонь, що зазнають негативних наслідків процесу тертя та корозійно-втомного руйнування. Підбір матеріалів для оброблення поверхонь елементів бурильної колони та внутрішньої поверхні керноприймального пристрою залежить від техніко-механічних показників, які можуть задовольняти вибрані матеріали, та від способу їх нанесення, оскільки промислові потреби вимагають мобільного устаткування для проведення технологічного процесу полімерного покриття безпосередньо на промислах.

Наведено огляд відомих методів, технологій, технічних засобів полімерного покриття металевих поверхонь та запропоновано використання математичної моделі для визначення міцнісних характеристик того полімерного покриття, яке може застосовуватися для певних умов експлуатації.

Ключові слова: полімерне покриття, зносостійкість, прихоплення, тертя.

Существенными проблемами нефтегазовой промышленности являются коррозионно-усталостное разрушение элементов бурильной колонны, прихваты бурильных и утяжеленных бурильных труб, происходящие при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Прихваты возникают из-за трения между стенками ствола скважины и элементами бурильной колонны. Трение препятствует обеспечению целостности керна в керноприемнике.

Рассматривается возможность устранения этих проблем за счет использования полимерно-композиционных материалов для обработки поверхностей, находящихся под воздействием процесса трения и коррозионно-усталостного разрушения. Выбор материалов для обработки поверхности элементов бурильной колонны и внутренней поверхности керноприемника зависит от технико-механических показателей, которым могут удовлетворять выбранные материалы, и от способа их нанесения, так как существует необходимость в мобильных установках для проведения технологического процесса полимерного покрытия непосредственно на промыслах.

Дан обзор известных методов, технологий, технических способов полимерного покрытия металлических поверхностей, предложено использование математического моделирования для определения прочностных характеристик того полимерного покрытия, которое может быть использовано для определенных условий эксплуатации.

Ключевые слова: полимерное покрытие, износостойкость, прихват, трение.

Significant problems in the oil and gas industry are corrosion-fatigue failure of drill string components, stuck drill pipe and drill collar, occurring during the drilling of directional and horizontal wells. Sticking arise from friction between the walls of the wellbore and the elements of the drill string. The friction prevents Integrity core in core receiver. The opportunity to address these problems through the use of polymer-composite material for the treatment of surfaces under the influence of friction and corrosion-fatigue failure. The choice of materials for surface elements drill string and the inner surface of core receiver depends on the technical and mechanical properties, which can satisfy the selected materials and the method of their application, as needs require commercial mobile units for the process of the polymer coating directly on the fisheries. This paper surveys the problems of known methods, technologies, technical methods regarding the polymer coating of metal surfaces, proposed the use of mathematical modeling to determine the strength properties of the polymer coating, which can be used for certain conditions.

Keywords: plastic coating, wear resistance, sticking, friction.

Дослідженню причини, через які виникають прихоплення бурильних колон та відбувається їх втомно-корозійне руйнування, присвячено багато наукових праць, але не зважаючи на це, вони все одно продовжують виникати, що вимагає матеріальних затрат і часу на їх ліквідацію.

В минулому столітті для захисту від корозії металу успішно застосовувалося покриття поверхні (напиленням або гальванічне) іншими

металами, зокрема цинком, міддю, хромом, нікелем.

З розвитком науки у нове століття прийшли нові технології. Так, на даний час успішно розвиваються технології покриття поверхонь на основі полімерних, лакофарбових, каучукових матеріалів та композицій на їх основі, які знаходять широке застосування в машинобудуванні, в техніці, в промисловості.

Аналіз наукових праць довів, що межі застосування полімерного покриття інтенсивно розширюються. Це зумовлено тими перевагами, які отримують металеві конструкції, захищені полімерним покриттям: низька адгезія до різних матеріалів, низька фрикційність, висока стійкість до хімічної агресії та ін.

Полімерне покриття дає можливість використовувати низькосортні марки сталі для виготовлення обладнання, що працює в агресивному середовищі, що, в свою чергу, призводить до підвищення терміну використання такого обладнання, а в цілому і до значної економії коштів.

В США з початку 90-х років основна кількість бурильних труб, що використовуються під час будівництва свердловин, мають полімерне покриття. В Україні такий напрям робіт практично відсутній, а досвід застосування полімерного покриття для труб магістральних нафтогазопроводів не може бути застосованим до бурильних труб, оскільки умови їх експлуатації є зовсім іншими.

Недостатнього поширення набули методи поверхневого зміцнення поверхонь, що за правильно вибраних режимів технологічного процесу дозволяють підвищити межу витривалості у 1,5-2 рази при одночасному підвищенні зносостійкості. До них відносяться як традиційні (хіміко-термічна обробка, поверхнево-пластична деформація за рахунок способу тренування), так і нові (плазмове напылення, лазерна обробка, іонна імплантація) методи.

На сучасному етапі розвитку науки і наукових технологій широкого застосування набуває полімерне покриття, яке стає бар'єром, що обмежує доступ агресивних середовищ до поверхонь, які ним захищаються.

Ще у 80-х роках в Татарстані на базі нафтовидобувних підприємств функціонували цехи зі створення емалевого покриття для насосно-компресорних труб. Але ця технологія на той час не відповідала технічним, економічним та екологічним вимогам.

Досліджуючи способи боротьби з прихопленнями під час буріння свердловин, було встановлено, що для запобігання прихоплень бурильних колон використовуються такі засоби, як додавання в промивальну рідину різноманітних змащувальних добавок, конструювання в компоновці бурильної колони пристроїв гідроімпульсної та ударної дії, нанесення спеціального покриття на зовнішню поверхню бурильних труб та використання захисних пристроїв, що встановлюються на колоні бурильних труб навпроти прихопле-небезпечного інтервалу в свердловині. Стосовно останнього способу відомо багато пристроїв як вітчизняних, так і зарубіжних авторів.

У часи бурхливого розвитку нафтогазової промисловості в колишньому СРСР щорічно понад 200 тис замків бурильних труб вилучалася з експлуатації через їх зношеність внаслідок тертя зі стінками стовбура свердловини.

Надзвичайно актуальним питанням є зменшення сил тертя між елементами компоновки

низу бурильної колони та стовбуром свердловини при бурінні похило-скерованих і горизонтальних свердловин із застосуванням гвинтових вибійних двигунів. Наявність значних сил тертя перешкоджає доведенню ефективного осьового навантаження на породоруйнівний інструмент, що призводить до зменшення механічної швидкості буріння, збільшення тривалості часу буріння.

Отже, актуальність застосування полімерного покриття поверхні елементів бурильної колони з метою запобігання її прихоплень, підвищення зносостійкості замків бурильних труб під час будівництва нафтогазових свердловин не викликає сумніву.

На основі аналізу літературних і патентних джерел встановлено, що основними напрямками проведення досліджень є:

- технологія полімерного покриття для труб нафтового сортаменту;
- матеріали та складові, для отримання полімерних покриттів;
- технологія та техніка отримання полімерного покриття.

Аналіз існуючих технологій і технік для нанесення зовнішнього покриття труб свідчить, що сучасні тенденції розвитку даної області значною мірою визначаються розробкою нових матеріалів, які можуть забезпечити високу якість покриття. Не залишені без уваги на сьогоднішній день традиційні види матеріалів, зокрема порошки, удосконалення складу яких базується на створенні гібридних сумішей і наповнених композицій. Відповідно, розвиваються технології порошкового покриття поверхонь.

Серед великої кількості полімерних матеріалів, що використовуються в якості захисного покриття, унікальними властивостями володіють фторопласти, що поєднують в собі високу хімічну стійкість до різноманітних агрегатних середовищ, високі діелектричні та антифрикційні властивості.

В роботах [1, 2, 3, 4] наведено результати експериментальних досліджень, на основі яких розроблено спосіб приготування полімерного фторопласт-вмісних матеріалів. Наведено технологічні рекомендації з нанесення полімерних покриттів способом авто- і електрофорезу на металеві поверхні, такі як сталь, алюміній і їх сплави.

Розробка і застосування ПМК дасть можливість забезпечити низький коефіцієнт тертя, високу роботоздатність, зносостійкість, самозмащування, стійкість до розшарування полімерного покриття в процесі експлуатації в свердловині, вібро- і ударостійкість, термостійкість і хімічну стійкість до агресивних середовищ.

Дослідження, що проводились протягом останніх років у Тихоокеанському університеті, довели перспективність застосування епоксидофторопластових матеріалів для широкого напрямку не лише триботехнічних виробів, зокрема підшипників, ущільнювальних систем [7], але й для покриття металевих поверхонь для різноманітних умов експлуатації. Розроблені

ними матеріали є високотехнологічними, володіють високою зносостійкістю, самозмащуванням, достатньо низьким коефіцієнтом тертя. До складу цих матеріалів входять: епоксидна смола, фторопласт-4, тверді мастила, армуючі компоненти, металеві порошки ЕФЛОНГ, ЕФ, ЛАСТ, ФЕЛОН. Специфічна технологія для виробництва епоксидофторопластових виробів вимагає спеціального обладнання, верстатів, інструментів, пристроїв, нових технологічних прийомів, дослідження нових зносостійких ПКМ в різноманітних умовах експлуатації, постійного вдосконалення модифікації і складу ПКМ. Результати цих досліджень дають можливість врахувати вибір компонентного складу під час розробки покриття для елементів бурильної колони, яке б задовольняло фізико-міцнісними характеристиками для специфічних умов експлуатації.

Дослідження показали, що сучасні модифікації епоксидофторопластових матеріалів містять в якості матриці епоксидні смоли, а як наповнювачі і антифрикційні матеріали – дрібнодисперсні фторопласти, графіт, дисульфід молібдену, металеві порошки бронзи, свинцю, скло, вуглеграфітові високомодульні волокна тощо, що забезпечує їм необхідні фізико-механічні властивості під час роботи без мастил і у водяних середовищах. Застосування мікроструктурного аналізу дає можливість оцінити дисперсність фторопластових і волокнистих наповнювачів, які визначають ступінь гомогенності внутрішньої структури отримуваних антифрикційних матеріалів. Діапазон температур, в яких можуть експлуатуватися епоксидофторопластові матеріали, лежить у межах від мінус 60° С до плюс 120° С, а зовнішні навантаження, які вони витримують, становлять до 100 МПа.

Важливими є дослідження адгезійної міцності епоксидофторопластів та інших фторопластових композицій на відрив та зсув, що дозволить отримати кількісні характеристики для використання їх на практиці.

Комплексно проведені дослідження показали [5, 6], що найбільш придатним для вирішення поставленої проблеми є використання дисперснонаповнених ПКМ і металоолімерних матеріалів із додаванням політетрафторетилену (ПТФЕ). Використання ПТФЕ, в якості полімерної матриці таких матеріалів, зумовлено унікальними властивостями: аномально низьким коефіцієнтом тертя (0,04÷0,05 по сталі без мастила), високою термостійкістю (температура початку розкладання 688 К), високою хімічною стійкістю (реагує тільки з розплавом лужних металів, трифтористим хлором і елементарним фтором за високих температур), ізоляційними властивостями, однак ПТФЕ має низьку зносостійкість в трибоспрямленнях (зношуваність ПТФЕ в процесі тертя в 4÷5 разів вища, ніж капролону, поліаміду, поліетилену і наповнених матеріалів на їх основі).

Модифіковані антифрикційні ПКМ на основі армованих фторопластових матеріалів (ЛАФМ), які є комбінованим металоолімерним композитом з макрогетерогенною структу-

рою, що складається з перемежованих ділянок міцного зносостійкого шару армуючої сітки і полімеру, здатні утворювати в процесі тертя проміжний шар мастила впродовж всього часу експлуатації. Встановлено, що тільки у випадку нагріву ЛАФМ в обмеженому просторі до температури плавлення ПТФЕ відбувається утворення монолітної структури полімеру, яке зумовлене коезійними і дифузійними процесами, а в процесі остигання спостерігається механічне закріплення полімерного шару в пористому просторі сітки. Модифікація поверхні на ущільнюючих виробках з ПТФЕ шляхом полімер-полімерного покриття, нанесеного з розчинів гетерополіаріленів, дозволяє зберегти еластичність і деформаційно-міцнісні властивості основного матеріалу, що водночас підвищує зносостійкість до 80 і твердість до 2 разів. У процесі тертя фторопластових композицій з порошками свинцю (розміри часток не менше 20 мкм) або з діоксином свинцю в зоні фрикційного контакту формується плівка перенесення, що містить фазу фториду свинцю з кубічною флюоритовою структурою, яка дає додаткове суттєве підвищення мастильних властивостей в зоні тертя завдяки наявності площин ковзання в кристалічній структурі. В процесі тертя у взаємодію з контактуючою поверхнею вступають не окремі макромолекули і утворення типу «стрічка», а надмолекулярні утворення – сфероліти, що перешкоджають процесу деформації, який супроводжує тертя і зношення матеріалу.

Розв'язок проблеми з отримання більш досконалих матеріалів іде двома шляхами, які взаємопов'язані між собою – експериментальним відпрацюванням і теоретичними дослідженнями. Теоретичні дослідження, в свою чергу, мають також два підходи. Перший з них відштовхується від вже існуючого досвіду напрацювання стосовно нових ПКМ, коли намагаються керувати вихідними характеристиками шляхом інтерполяції залежностей вихідних характеристик ПКМ від параметрів на виході. Цей підхід називають експериментально-статистичним або кібернетичним, маючи на увазі підхід до ПКМ як до свого роду «чорної скриньки». Другий підхід має декілька назв, а саме – структурний, багаторівневий, мультимасштабний і таке ін. Матеріал розглядається як складна конструкція, в якій окремі фази чи елементи структури відіграють роль підконструкцій. За такої умови проводиться пряме моделювання поведінки матеріалу під навантаженням з урахуванням внутрішньої геометрії елемента об'єму, властивостей і характеру взаємодії фаз матеріалу (елементів його структури). Це робиться з врахуванням механіки суцільних середовищ із застосуванням різноманітних числових методів, а також інколи з використанням дискретних методів. В роботах [8] розглядаються шляхи пошуку формування оптимальних і раціональних деформаційно-міцнісних властивостей композиційних матеріалів.

На теперішній час визначенню механічних властивостей ПКМ (і взагалі структурно-

неоднорідним середовищем) присвячено багато робіт. Структурний підхід орієнтується на розгляд структури матеріалу і встановлення зв'язку між властивостями додатків (включень), матриці і способами їх взаємодії з ефективними характеристиками матеріалу. В роботі [8] вказано, що «структурну механіку можна розглядати і як теоретичну базу для побудови континуальних (феноменологічних) механічних моделей, які застосовують в конструкторській діяльності».

У процесі визначення механічних властивостей ПКМ широкого застосування набув такий підхід, за якого матеріал замінюють однорідним середовищем з певними ефективними характеристиками. За такої умови ефективні характеристики цього середовища відшукують з аналізу елемента структури або елемента об'єму, що повинні відображати деякі характерні особливості матеріалу. Усереднення проводиться з врахуванням рівних енергій деформації, які обчислюються з моделей однорідного і неоднорідного середовищ із застосуванням розрахунків за методом кінцевих різниць, кінцевих елементів, граничних інтегральних рівнянь тощо. Спільною проблемою для пропонованих моделей є вибір елемента структури, яким замінюється структурно-неоднорідне середовище. Широкого застосування набула модель, що складається з матриці і одного включення (одного компонента). Форма цього включення може бути довільною: сферичною, еліпсоїдальною і навіть у вигляді квадрату (в плоскому випадку). Аналітичні розв'язки цих моделей наводяться в джерелі [9].

Для аналізу деформаційно-міцнісних характеристик дисперсно наповнених ПКМ застосовують моделі, які враховують систематичне або випадкове розміщення часток за умови ідеального контактування між матрицею і включенням. Отримані розв'язки дають можливість зробити оцінку ефективних (середніх за об'ємом) пружних або в'язкопружних характеристик матеріалу.

В.А. Кочетков [10] пропонує методом ефективних середовищ робити розрахунки механічних характеристик композиції, наповненої складовими або порожнинними сферичними включеннями (додатками), разом з тим, І.Н. Фролова і А.В. Мотавкін [11] пропонують проводити аналіз механічних властивостей композиційних матеріалів із застосуванням змішаного підходу Фойгта і Рейса. Ця модель враховує в'язкопружні властивості матриці, порушення умов ідеального контакту на межі поділу фаз, а також випадковий розподіл включень. Г.Н. Кувиркін і А.В. Єфименко [12] пропонують використовувати теорію суміші, яка «оперує середніми за компонентами композиту величинами: напруженнями, переміщеннями і деформаціями». Автори вважають, що застосування цієї теорії дає можливість враховувати ефекти, яких не зауважує теорія ефективних модулів.

У процесі дослідження структурно-неоднорідного середовища варто застосовувати моделі

самоузгодження. У цих моделях, під час розрахунків виділяється лише одна структурна неоднорідність, а решта замінюється деяким збуренням. Це збурення може бути описане як середовище з ефективними характеристиками, в яке занурене включення, або у вигляді поля, що вводиться в точках матриці матеріалу. А.А. Паньков [12] використовує узагальнений метод самоузгодження. Цей метод передбачає зведення задачі прогнозування ефективних деформаційно-міцнісних властивостей композитних матеріалів з «випадковими структурами до розв'язку простіших задач про включення з перерізним шаром в середовищі з шуканими ефективними пружними властивостями». В [12] прогноуються ефективні пружні властивості сферопластиків узагальненим методом самоузгодження.

Серед дискретних методів широке застосування отримав метод молекулярної динаміки, за якого матеріал розглядається як система твердих кульок. Взаємодія між елементами визначає механічні властивості середовища. Цей метод широко використовується в моделюванні покриття, яке містить порошки металів. Переваги дискретного методу в порівнянні з методами механіки суцільних середовищ проявляються у можливості більш простого опису процесів руйнування. При цьому зникають питання стосовно введення ефективної величини відносного об'єму пошкодження.

Б.Є. Победря в межах підходів механіки суцільних середовищ проаналізував особливості моделювання композитів і зауважив, що моделювання нанесених на металеву поверхню композитних матеріалів слід проводити з врахуванням нестабільності їх фізико-механічних властивостей. Для цього «інколи варто застосувати закони статистичної фізики, коли за статистичними характеристиками матеріальних властивостей визначаються статистичні характеристики шуканих величин», а інколи варто вводити приведені середовища з «ефективними визначеними співвідношеннями», які визначаються теоретично або з експерименту. Наголошується також на появі нового підходу у моделюванні композитних матеріалів в межах механіки деформованого твердого тіла – «гомогенізації», коли «обчислюються визначальні величини наведеного середовища і дається енергетична оцінка заміни розв'язків краєвої задачі з вихідними визначальними співвідношеннями на розв'язки краєвої задачі з визначальними співвідношеннями наведеного середовища». Але такий підхід має певні недоліки, так, наприклад, неможливо обчислити мікронапруження в композиті, адже міцність визначається сукупністю параметрів напружено-деформованого стану в точці, а наявність внутрішніх меж призводить до суттєвої осциляції параметрів всередині матеріалу, навіть за рівномірного розподілу зовнішніх навантажень.

П.М. Огибалов, В.А. Ломакін і Б.П. Кішкін виділяють два шляхи в дослідженні деформовано-міцнісних властивостей нанесених на поверхню композиційних матеріалів (НКМ). Пер-

ший з них полягає у розгляді матеріалу як конструкції зі своєю внутрішньою структурою. За цієї умови «завдання полягає у віднайденні залежностей між середніми характеристиками напружень і деформацій а також умов міцності композиційного матеріалу в залежності від властивостей додатків, які зв'язують, армують та від зв'язку між компонентами на межі їх поділу». Другий шлях дослідження деформівно-міцнісних властивостей наповнених композитів полягає у розгляданні їх як квазіоднорідних середовищ і використанні при цьому традиційних для механіки засобів, оскільки більшість наповнених композитів є макроскопічно ізотропними, тому їх поведінка може описуватися ізотропними лінійною і нелінійною теоріями пружності і в'язкопружності.

Відомо, що сили прихоплення залежать від сукупності сил, зумовлених перепадом тиску промивальної рідини і липкістю кірки поверхні стовбура свердловини, та коефіцієнта тертя. Оскільки сила, що зумовлена перепадом тиску, переважно не піддається регулюванню, бо густина і характеристики бурового розчину зумовлені геолого-технологічними умовами, тому є необхідним максимально зменшити коефіцієнт тертя в процесі взаємодії між стовбуром свердловини і поверхнею бурильних труб. Для цього можуть бути використані полімерні покриття елементів бурильної колони.

Як було наведено вище, полімерні покриття володіють низьким коефіцієнтом тертя, але існує проблема їх стирання з поверхні в процесі притискання бурильної колони до гірської породи, яка утворює стінки свердловини. Отже, існує проблема прогнозування зношуваності цих покриттів за заданих параметрів буріння та з визначення оптимальної товщини покриття для забезпечення позитивного результату під час будівництва свердловини. З урахуванням глибини свердловини та проходки на долото, які визначають шлях тертя бурильної колони, слід визначити силу її притискання до стінок свердловини, та емпірично визначити зносостійкість полімеру.

Під час переміщення бурильної колони в свердловині тертя має дві складові механічну і молекулярну. Механічна складова зумовлена механічною взаємодією шорстких шарів поверхонь контактуючих матеріалів, товщина яких значно перевищує молекулярні шари. Йдеться про значну шорсткість поверхонь, що труться, і які взаємодіють своїми нерівностями. У процесі механічного тертя за взаємодії тіл що труться, втягуються віддалені від поверхні шари. Це зумовлено тим, що зі збільшенням інтенсивності викривлення стовбура свердловини і ваги нижньої ділянки труб, більше навантаження прикладається до труб і свердловини, відповідно більшим є зчеплення шорсткої поверхні труб із шорсткими стінками свердловини. Полімерне покриття володіє, порівняно з поверхнею труб, гладкою поверхнею, тому ця складова тертя зменшується.

Без врахування сил, що зростають з часом і залежать від щільності стінок стовбура сверд-

ловини та адгезійних сил, значна частка сумарних зусиль, які потрібні для подолання опору рухові породоруйнівного інструменту припадає на руйнування породи долотом та здирання стінок свердловини замками бурильної колони. Окрім того, через утворення нерухомої маси бурового розчину під час простою, також є необхідним прикладання певного зусилля для зрушення її навколо труб і долота. Під час взаємодії пристінкового шару свердловини з елементами КНБК існує їх зчеплення. Шорсткості поверхні труби і замків в процесі руху сприяють кольматовані стінки свердловини, чим спричинюють підвищення опору переміщення.

Окрім механічної складової тертя, зумовленої шорсткістю труб, відбувається фізико-хімічна взаємодія труби з частинками твердої фази кірки на рівні молекулярних шарів між атомами і молекулами контактуючих тіл, тобто виникає молекулярне тертя. Через взаємне притягання атомів і молекул тіл, що дотикаються, або що наблизились на дуже малі відстані, виникають сили взаємодії між тілами. Встановлено, що сила такої взаємодії є обернено пропорційною шостій степені віддалі між поверхнями тіл (за Б.В.Дерягіним), до того ж сила взаємодії зі збільшенням відстані між поверхнями спочатку є від'ємною і має адгезійний характер, спричинюючи тим самим злипання поверхонь, а потім стає додатною, тобто розклинюючою. Теорія тертя, з врахуванням взаємодії тіл на атомно-молекулярному рівні і явища притискання та адгезії, описує сумарну силу рівнянням:

$$F = \mu(N + AS), \quad (1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя;

$S$  - площа істинного контакту, м<sup>2</sup>;

$A$  - питома адгезія, що діє на одиниці площі істинного контакту (Н/м<sup>2</sup>);

$N$  - сила притискання, Н.

Стосовно першої складової в рівнянні (1), можна сказати, що для подолання взаємовідштовхування двох тіл і введення їх у контакт є необхідним прикладання певної сили  $N$ , і вона буде тим більшою, чим більшою є одиниця адгезійної площі істинного контакту між тілами, тобто більшим буде зусилля, необхідне для руху.

Під час руху інструменту величина сили  $N$  визначається притискаючим зусиллям, що діє по нормалі до площі контакту труби і стінки свердловини. Навіть за відсутності перепаду тиску для зрушення тіла чи труби в кірці слід подолати адгезійні зв'язки в місцях істинного контакту, що утворився через тиск труби на кірку, що виникає під дією її власної ваги. На практиці спостерігається одночасно як адгезія, так і розклинювання тіл, зумовлене взаємодією електронних оболонок атомів, що виникає в процесі їх взаємного перекриття, або так звана молекулярна шорсткість. Через таку взаємодію виникають сили, рівнодійна яких спрямована за нормаллю до поверхонь поділу, тобто сили адгезії і сили, спрямованої тангенціально до цих поверхонь – сили тертя. Оскільки радіус дії сил

притягання є співрозмірним з розмірами атомів, а радіус дії сил відштовхування є значно більшим, через наявність шорсткості поверхонь тіла неможливо наблизити так, щоб переважали сили відштовхування, тому результуючою силою їх взаємодії є адгезійна сила.

Зрушення і рух труби в промивальному розчині може відбуватися як з руйнуванням зв'язків по поверхні контакту «метал-кірка», так і всередині кірки. Тобто, в залежності від сили адгезійних зв'язків між частинками кірки і металу труби може мати місце як зовнішнє, так і внутрішнє тертя.

Для визначення притискуючих зусиль бурильної колони до стінок свердловини розглянемо процес контактування бурильної колони зі стінками свердловини під час спуско-підйомних операцій.

У вертикальній свердловині чи за її нахилу вільно підвишені обважені бурильні труби (ОБТ) і турбобур не можуть мати значної площі і зусиль контакту зі стінками свердловини, оскільки долото і центратори великого діаметра забезпечують суттєвий зазор між ними. В процесі викривлення свердловини труба дотикається до стінок свердловини в інтервалах її викривлення, і що більший нахил викривлення і зусилля притискування колони до стінки свердловини, які при цьому виникають, то більшими стають довжина і площа контакту між ними.

За методикою М.М. Александрова зусилля притискання залежать від нахилу і викривлення свердловини в інтервалі, що розглядається, і нижче густини промивальної рідини і ваги нижньої ділянки бурильної. Для розрахунку притискуючих зусиль елементів бурильної колони згідно цієї методики нами було застосовано програму «MathCAD» і отримано графічну залежність зміни притискуючих зусиль в залежності від викривлення на 25-ти метрових інтервалах свердловини (рис. 1). Розрахунки наведено для компоновки низу бурильної колони, що включає:

- долото діаметром 215 мм;
- турбобур ЗТСШ-195 (трисекційний);
- ОБТ 178 мм – довжиною 100 м;
- збалансовані бурильні труби діаметром 127 мм – довжиною 700 м;
- бурильні труби – решта.

Розрахунки свідчать, що залежно від віддалі ділянки поверхні ОБТ чи турбобура до долота в інтервалі викривлення величина притискуючої сили змінюється в певному діапазоні. Відповідно до цього на рис. 1 верхня крива характеризує величину притискуючих зусиль для ділянки КНБК, що знаходиться на максимальній відстані від долота, нижня – на мінімальній. Для розрахунку товщини одного полімерного покриття застосовувалася методика дослідження полімерних покриттів на зношуваність і стирання на приладі АР-40, що має барабан з корундовим покриттям, на який може подаватися змінне зусилля, і металеву підкладку, на яку наноситься полімерне покриття. Після дослідження зразок зважувався для визначення зношуваності (в мг/год).

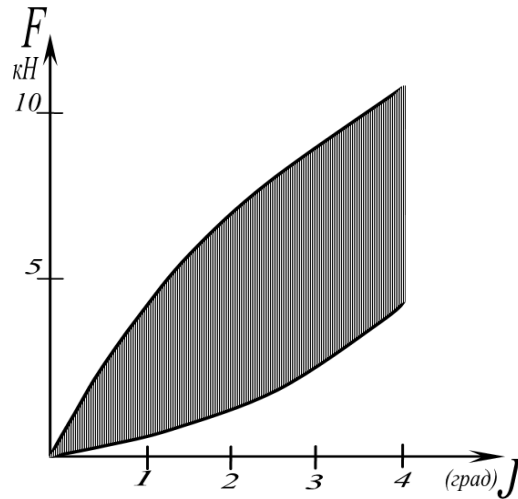


Рисунок 1 – Залежність притискуючих зусиль КНБК від кута викривлення свердловини

За відомої швидкості обертання барабана, його діаметра і часу дослідження визначається шлях тертя, на якому відбулося зношування і навпаки, зношування, яке відбулося на заданому шляху тертя. Товщину зношеного шару визначали з умови:

- об'єм зношеного полімерного покриття за 1 год:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot l,$$

де  $R$  - радіус поверхні барабана; з іншого боку, цей же об'єм можна визначити як

$$V = \frac{m}{\rho},$$

де  $m$  – маса полімерного покриття, зношеного за 1 год, кг;

$\rho$  - густина полімерного покриття, кг/м<sup>3</sup>.

Прирівнявши праві частини рівнянь, одержимо:

$$l = \frac{m}{\rho \pi R^2}.$$

Знаючи частоту обертання барабана, легко визначити величину зношування, яка вимірюється в довжині шляху тертя за годину. Залежність зношуваності полімерного покриття від навантаження є лінійною, тому запишеться рівнянням:

$$G = kF$$

де  $k$  - коефіцієнт зношуваності, м/год.

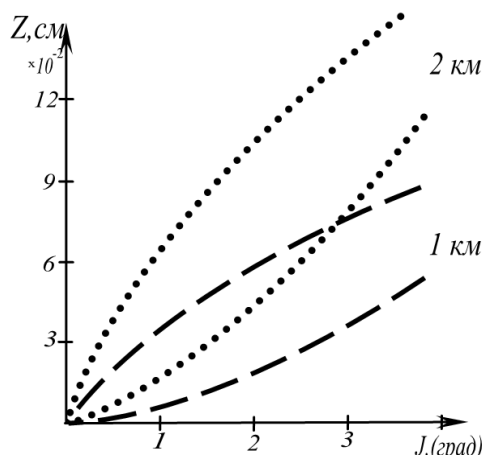
Для розрахунку товщини шару зношеного полімерного покриття за заданого питомого зношення, притискуючої сили і шляху тертя, що визначається для заданої глибини свердловини і проходки, використовується та ж програма «MathCAD». Вона ж застосовується і для оберненої задачі – визначення зносостійкості полімерного покриття, необхідної для забезпечення збереження покриття за заданої товщини, притискуючих зусиллях, шляху тертя і проходки. Тип покриття підбирався з врахуванням фрикційності і адгезійності. Для розрахунків необ-

хідної товщі полімерного покриття виходили з таких умов:

- питома зношуваність – 0,15 мг/год;
- зношуваність 1152 м/год;
- коефіцієнт зношуваності –  $0,65 \cdot 10^{-8}$  см/мН.

За результатами проведених досліджень впливає:

- зношуваність зростає зі збільшенням притискуючих зусиль та глибини свердловини;
- полімерне покриття завтовшки 0,95 мм може застосовуватись для буріння свердловини до 2000 м за проходки в один рейс, що дорівнює 100 м, і за притискуючої сили 700 Н. Притискуюча сила 700 Н для вищенаведеної КНБК виникає в процесі викривлення стовбура свердловини  $1 \div 1,5^\circ$  на 25 м. Разом з тим, було отримано результати розрахунку питомої зношуваності полімерного покриття в залежності від його товщини і сили притискування. Ці вимоги зростають зі збільшенням сили і зменшенням товщини покриття. Це ілюструє графічна залежність (рис. 2) необхідної товщини покриття від викривлення стовбура свердловини на різному шляху тертя. Як видно з рисунку 2, зношуваність зростає зі збільшенням цих величин.



**Рисунок 2 – Залежність зношуваності від викривлення стовбура свердловини за різних шляхів тертя (верхня і нижня оцінки)**

Як було показано вище, сила прихоплення, що складається з механічної складової  $F_M$ , зумовленої дією перепаду тиску і адгезійної сили  $F_A$  взаємодії металевої поверхні труб з поверхнею кірки стовбура свердловини, описується рівнянням Дерягіна:

$$F = \mu(F_M + F_A), \quad (2)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень нами встановлено, що полімерне покриття не впливає на механічну складову  $F_M$ , але дозволяє зменшити адгезійну складову  $F_A$  і коефіцієнт тертя  $\mu$ .

Адгезійна складову  $F_A$  пропорційна добутку питомої адгезійної сили  $A$ , що має розмір-

ність тиску, на площу контакту труби з кіркою поверхні стовбура свердловини:

$$F_A = 2AR_T l \sin \alpha, \quad (3)$$

де  $R_T$  - радіус труби, м;

$l$  - довжина елемента труби, м;

$\alpha$  - половина кута охоплення труби кіркою:

$$\alpha = \arccos \frac{R_c^2 - (R_c - R_T)^2 - R_T^2}{2R_T(R_c - R_T)}. \quad (4)$$

В умовах притискання колони труб до стінки свердловини в інтервалах нахилу і викривлення стовбура свердловини відбувається на стінці ущільнення або консолідація з боку колони труб. За таких умов виникає градієнт тиску. Це призводить до витискання частини рідини з пристінкового шару стовбура свердловини і кірка ущільнюється. Диференціальне рівняння, яке враховує цей процес, що веде до зміни тиску в кірці, задається рівнянням Терцагі:

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = C_g \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2}, \quad (5)$$

де  $C_g$  - коефіцієнт консолідації.

Граничні умови, що накладаються для розв'язання цього рівняння, наступні:

Надлишковий тиск вологи в порах, що діє на стінки свердловини порівняно з пластовим, дорівнює нулю  $P_f(0, t) = 0$ ;

Початковий розподіл гідравлічного тиску в кірці є лінійним, або  $P_f(x, 0) = px / L$ ;

Поверхня труб є непроникна, або  $\frac{\partial P_f(L, t)}{\partial x} = 0$ .

Тоді розв'язок рівняння Терцагі за даних граничних умов набуде вигляду:

$$P_f(x, \tau) = \frac{8}{\pi^2} \Delta P \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \exp[-(2n-1)^2 \cdot N] \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \right], \quad (6)$$

де

$$N = \frac{\pi^2}{4} \tau = \frac{\pi^2 k \cdot t}{4\eta \cdot m_g L^2}; \quad (7)$$

$k$  - проникність кірки поверхні стовбура свердловини, %;

$\eta$  - в'язкість фільтрату промивальної рідини, Па·с;

$m_g$  - показник ущільнення кірки, кг/м<sup>2</sup>;

$L$  - товщина кірки стінки свердловини, мм;

$t$  - час, с;

$C_g$  - коефіцієнт консолідації;

$\Delta P = P_r - P_0$  - різниця тисків, Па;

$P_r$  - гідравлічний тиск, Па;

$P_0$  - тиск біля стінки свердловини, Па;

$\tau$  - фактор часу, с.

На поверхні контакту труби з кіркою тиск рідини і навантаження на частинки кірки будуть змінюватися так:

$$P_f(L, \tau) = \frac{8}{\pi^2} \Delta P \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-(2n-1)^2 N]}{(2n-1)^2}, \quad (8)$$

$$P_S(L, \tau) = \Delta P \left[ 1 - \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-(2n-1)^2 N]}{(2n-1)^2} \right]. \quad (9)$$

Для визначення коефіцієнта консолідації  $C_g$  використовуємо метод Казагранде, який передбачає апроксимацію кривої деформація-час у вигляді залежностей, що поєднують фактор часу  $\tau = \frac{C_g t}{L^2}$  і середні напруження в при-

стінковій кірці стовбура свердловини  $P_{cp}$ :

$$\tau = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \left( \frac{P_{cp}}{100} \right)^2 & \text{за } P_{cp} < 53\%; \\ 1,781 \div 0,933 \lg(100 - P_{cp}) & \text{за } P_{cp} > 53\%. \end{cases}$$

На основі проведених теоретичних досліджень, що стосувалися літературно-патентного пошуку, проведення математичних розрахунків і математичного моделювання процесів, пов'язаних з дослідженнями міцнісно-механічних характеристик полімерного покриття, було проведено експериментальні дослідження з вибору композиту і технології полімерного покриття елементів компоновки низу бурильної колони. Обрано три способи полімерного покриття, які, на наш погляд, є економічно і технологічно вигідними. Вибір полімерного складу, наповнювачів та підкладок проводився з одержаних теоретичних досліджень та за результатами комп'ютерного програмного моделювання в системі «MathCAD», які найбільше задовольняють вимогам зносостійкості.

Для практичного застосування теорії міцності стосовно розрахунку довговічності адгезійного з'єднання метал-полімер рекомендується спосіб визначення енергії активації руйнування і коефіцієнта, що характеризує чутливість матеріалу до механічних напружень.

За експериментальними дослідженнями встановлено:

1) найбільш оптимальний технологічний склад полімерно-композиційного матеріалу, що забезпечує високу зносостійкість покриття на сумарному шляху тертя в межах 40 000÷75 000 метрів;

2) найбільш вдало поєднують в собі поставлені вимоги до полімерного покриття поліаміди, які за зносостійкістю переважають не тільки інші полімери, а й інші антифрикційні метали і сплави;

3) оптимальну товщину полімерного покриття, яка забезпечує необхідну зносостійкість на даному шляху тертя, що складає 0,82÷0,93 мм; разом з тим така мала товщина покриття не сприяє тепловим напруженням на поверхнях;

4) підібрана технологія полімерного покриття елементів бурильної колони не залежить від конфігурації поверхні, що покривається, а дотримання температурно-часового режиму забезпечує не лише адгезійну міцність покриття на поверхні, а й стабільність в процесі експлуатації.

## ВИСНОВКИ

Полімерне покриття елементів бурильної колони запобігає корозійно-втомному руйнуванню, що значно підвищує термін їх експлуатації.

Отримано склад полімерного покриття, який за незначної товщини 2÷3 мм та відповідної технології нанесення забезпечує високі фізико-технічні характеристики цього покриття на поверхні елементів бурильної колони і в процесі експлуатації володіє низьким коефіцієнтом зношуваності на достатньо великих шляхах тертя, які складають близько 40÷75 км.

Поверхня бурильної колони, що покрита отриманим полімерним покриттям, володіючи низьким коефіцієнтом тертя (~0,025) у промивальній рідині, не здатна до прихоплення, а це, в свою чергу, забезпечує безаварійне буріння нафтогазових свердловин, суттєве зменшення часу на їх будівництво, відсутність колосальних затрат, спричинених аваріями через прихоплення бурильної колони.

Полімерне покриття внутрішньої поверхні НКТ підвищує їх довговічність в десятки разів, оскільки унеможливорює осідання нафтопродуктів (парафінів і таке ін.) на їх стінках.

Полімерне покриття внутрішньої частини керноприймального пристрою забезпечує збереження цілісності керна, що є важливим фактором для отримання інформації про міцнісні характеристики породи, в якій проводиться процес буріння.

Процес полімерного покриття є можливим безпосередньо на базі замовника, оскільки є методом, який можна здійснити в умовах нафтогазових промислів з використанням мобільного устаткування. Наявність такої можливості дозволить отримати полімерне покриття на бурильних, обсадних та насосно-компресорних трубах як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях, де це є необхідним, що з досвіду проведених досліджень є економічно вигідним.

## Література

1 Дворниченко Г.Л. Диффузиофоретическое осаждение полимерных дисперсий с целью получения защитных покрытий на металле / Г.Л. Дворниченко, Ю.В. Нижник, Т.В. Славиковский, Л.В. Николайчук // Коллоидный журнал. – 1993. – Т. 55, № 1. – С. 45-48.

2 Дерягин Б.В. Микроскопический метод исследования диффузиофореза / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, З.Р. Ульберг, Т.В. Кузнецова // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. XLII, № 3. – С. 464 - 468.



- 3 Ульберг З.Р. Диффузиофорез при автоосаждении полимерных покрытий / З.Р. Ульберг, Г.Л. Дворниченко, И.И. Ивженко // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1985. – № 3. – С.29-31.
- 4 Либерман А.И. Влияние параметров хемоосаждения на скорость образования полимерных осадков / А.И. Либерман, В.Л. Таланов, В.В. Верхоланцев // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1984. – № 1. – С. 35-38.
- 5 Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
- 6 Трение, изнашивание и смазка: Справочник: под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с. – Кн. 1.
- 7 Сибирев А.О. Адсорбционные явления при электроосаждении карбоксилсодержащих олигомеров: Дисс. к-та хим.наук. – М., 1987. – 207 с.
- 8 Мошев В.В. Структурные механизмы формирования механических свойств зернистых полимерных композитов. / В.В. Мошев, А.Л. Свистков, О.К. Гаришин и др. – Екатеринбург: УрС РАН, 1997. – 508 с.
- 9 Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби. – М.: Мир, 1967. – 410 с.
- 10 Фролова И.Н. Механические характеристики дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе термопластической матрицы в изделиях / И.Н. Фролова, А.В. Мотавкин, А.И. Жаров, В.А. Телешов // Пластмассы. – 1987. – № 5. – С. 15-18.
- 11 Паньков А.А. Прогнозирование эффективных упругих свойств сферопластиков обобщенным методом самосогласования / А.А. Паньков // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – № 3. – С. 186-190.
- 12 Паньков А.А. Анализ эффективных упругих свойств однонаправленного волокнистого стеклопластика обобщенным методом самосогласования / А.А. Паньков // Известия АН. МТТ. – 1999. – № 4. – С.78-86.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*28.01.13*

*Рекомендована до друку*

*професором **Мойсишиним В.М.***

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*професором **Давиденком О.М.***

*(Дніпропетровський НГУ, м. Дніпропетровськ)*