

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Стефанишин Андрій Богданович

УДК 622.276.054

ДИСЕРТАЦІЯ

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ
З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ

133 – Галузеве машинобудування
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Стефанишин А.Б.

Науковий консультант:

Копей Богдан Володимирович
доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2020

АНОТАЦІЯ

Стефанишин А.Б. Прогнозування та підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2020.

Дисертація присвячена удосконаленню працездатності насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями, що базується на використанні ефективного технологічного процесу в процесі їх ремонту, який забезпечує надійність насосних штанг та їх довговічність в процесі подальшої експлуатації.

Мета дослідження - підвищення працездатності насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями з використанням ефективного технологічного процесу в процесі їх ремонту.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі необхідні завдання:

1 Проаналізувати причини виникнення дефектів у насосних штангах, методи їх контролю та сучасні методи їх попередження.

2 Дослідити ріст коротких тріщин втоми в насосних штангах, методи їх вирощування та гальмування за допомогою розроблених методів.

3 Визначити характеристики втоми насосних штанг з короткими тріщинами після використання захисного покриття.

4 Вдосконалити метод прогнозування довговічності насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями та побудувати діаграму їх втомної міцності.

5 Визначити ефективний технологічний процес ремонту насосних штанг, який забезпечував би їх надійність та довговічність в процесі подальшої експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес гальмування росту тріщин насосних штанг під час механізованого способу видобутку нафти з використанням штангових свердловинних насосних установок, що сповільнює розвиток коротких тріщин, які призводять до зміни технічного стану установки та аварійних ситуацій.

Предмет дослідження: методи гальмування тріщин бандажуванням та нанесенням поліуретанових покриттів на поверхню насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями.

Для вирішення поставлених задач використані методи теорії надійності, методи математичної статистики, методи спектрального та кореляційного аналізу, методи технічної діагностики, комплексне застосування математичного, фізичного, та комп'ютерного моделювання об'єктів дослідження для підтвердження адекватності отриманих результатів. Для підтвердження адекватності отриманих результатів на лабораторних установках застосовано експериментальні методи.

Проведено аналіз причин виникнення і методів контролю пошкоджень та дефектів в насосних штангах та закономірності росту коротких тріщин втомних сталей.

Визначено підходи лінійної механіки руйнування, що широко використовують для оцінювання опору росту втомних тріщин, а також викладено обґрунтування доцільності використання теоретичних і експериментальних методів на різних етапах досліджень. Проаналізовано методику вирощування і гальмування росту коротких тріщин.

Проведено оцінювання ефективності нанесення розробленого модифікованого поліуретанового покриття насосних штанг згідно з технічними умовами з огляду гальмування росту коротких втомних тріщин. Таким чином, під дією циклічного навантаження насосних штанг, поверхневі короткі тріщини будуть внаслідок навантаження від внутрішнього тиску розкриватись і перший шар покриття заповнить порожнину тріщини, а після затвердіння будуть виконувати роль клина. Це за циклічного навантаження зменшує циклічну деформацію сталі в околі вершини тріщини, що призводить до підвищення опору поширенню втомної тріщини та її гальмуванню. Нанесене на зразок покриття додатково створює протизносний ефект, оскільки має добавки та високу адгезію до поверхні сталі, що збільшує захисні властивості покриття.

Визначено прогнозування насосних штанг за умови зміцнювального ефекту розробленого покриття у випадку підвищеної асиметрії навантаження.

Обґрунтовано та визначено фізико-механічні властивості різних захисних покриттів. Визначено, що металеве покриття відрізняється високою корозійною стійкістю і низькою питомою масою.

Запропоновано методику покриття насосної штанги та визначено фізико-механічні властивості даного покриття, яке являє собою конструкцію на основі модифікованого поліуретану.

На основі проведених випробувань ремонтних гібридних та сталевих насосних штанг побудовані повні діаграми втомного руйнування з імовірнісною оцінкою $P(N)$ довговічності насосних штанг, за допомогою яких можна прогнозувати їх ресурс. Побудовано на основі отриманих результатів діаграми втомної міцності гібридних насосних штанг в порівнянні із склопластиковими насосними штангами при циклічному згині. За допомогою комп'ютерної програми і розроблених методик можна прогнозувати ресурс сталевих, склопластикових і гібридних насосних штанг та визначити періодичність проведення їх дефектоскопії. Це дозволить раціонально використовувати насосні штанги та скоротити аварійність в процесі експлуатації свердловин.

Пропонується використання в процесі ремонту штанг технології їх зміцнення шляхом нанесення захисного модифікованого поліуретанового покриття. Описана технологія дасть можливість збільшити ресурс відремонтованої насосної штанги та повторно використовувати для експлуатації в свердловині. Також пропонується використання комбінованого покриття для захисту насосних штанг від корозії, корозійної втоми, зносостійкості.

Дістала подальший розвиток оцінка розрахунку довговічності штанги за допомогою програми MathCAD та розрахунку критичної довжини тріщини з врахуванням дотичних напружень, а також розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги з врахуванням дотичних напружень залежно від величини крутного моменту. Визначено критичну глибину тріщини та довговічність штанги за допомогою програми *MathCADi* з врахуванням дотичних напружень та побудована графічна залежність довговічності штанги в залежності від

критичної глибини тріщини при збільшенні величини крутного моменту від 50 до 250 Нм.

Вирішено одну з головних проблем – оцінку граничного стану елементів конструкції, зокрема насосних штанг, які схильні до одночасного впливу циклічних і статичних навантажень, а також асиметричного навантаження.

Запропоновано відновлення технічних характеристик насосних штанг методом знімання верхнього шару металу шляхом проточування, тобто знімання коротких тріщин, які утворилися в процесі експлуатації штанги. На основі результатів випробувань нових і відпрацьованих насосних штанг можна зробити висновок, що нанесення на поверхню штанги поліуретанового покриття збільшує її довговічність в декілька разів. Зміцнення нових та відпрацьованих насосних штанг, дозволяє підвищити довговічність перших і продовжити час роботи відпрацьованих штанг, які експлуатувалися в агресивних середовищах нафтових свердловин. Це дозволить скоротити витрату насосних штанг, що вводяться в експлуатацію. В запропонованому способі вирішується завдання ремонту штанги і максимального використання ресурсу нафтового прокату, повернення у роботу значної частини відбракованих штанг. Також вирішується завдання відновлення технічних характеристик насосної штанги, тобто усунення пошкоджень, які виникають на поверхні штанги в процесі експлуатації, а також зміцнення штанги поверхневим наклепом. Результати експериментів свідчать, що запропонований метод відновлення штанг забезпечує зростання обмеженої границі витривалості зразків згідно запропонованої технології відновлення штанг в 3-4 рази. У результаті чого в поверхневому шарі насосної штанги утворюються залишкові напруження стиску, які добре впливають на її втомну міцність, а в центральній частині штанги виникають залишкові напруження розтягу.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень вдосконалено конструкції з'єднань склопластикових насосних штанг із сталеву головою. Таке з'єднання має достатні характеристики міцності та може використовуватися в свердловинах глибиною до 2500м.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

- запропонована та впроваджена у виробництво технологія відновлення насосних штанг, що полягає в усуненні пошкоджень поверхні, які виникають на поверхні штанги в процесі експлуатації (тріщини, потертості, нерівномірне зношування штанги по діаметрі, пошкодження внаслідок корозії), методом проточування, та використання поверхневого наклепу, що дає можливість підвищити втомну міцність штанги та інші її механічні характеристики, а також повернути значну частину відпрацьованих штанг в експлуатацію.

- проведено оцінку впливу напружень кручення при складному напруженому стані штангової колони, шляхом оцінки цього виду навантаження на ріст втомної тріщини, що дає змогу прогнозувати ресурс при обертанні насосних штанг обертачем та визначити періодичність проведення їх дефектоскопії, що забезпечить безаварійну роботу свердловини.

- отримані результати значень при дії різних напружень згину відновлених ремонтних штанг згідно розробленої технології, через проведені випробування та відповідні розрахунки, що дало можливість визначити межу корозійної втоми для різних діаметрів насосних штанг.

- отримали подальший розвиток перспективи відновлення гібридних насосних штанг з тріщинами, що полягає в накладанні бандажів із скловолокна (скловолокно довжиною 50 см та шириною 10 см накладати в місці виникнення тріщин по контуру штанги в 6 шарів) та епоксидної смоли, що дає можливість подовжити їх ресурс на 15-20% при видобуванні нафти з глибоких свердловин.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено та впроваджено у виробництво технологію відновлення насосних штанг, що вирішує завдання ремонту штанги і максимального використання ресурсу нафтового прокату, повернення в роботу значної частини відбракованих штанг та дає великі техніко-економічні переваги в порівнянні з відомими способами відновлення насосних штанг.

2. За допомогою розробленої методики і комп'ютерної програми *MathCAD* та отриманих результатів досліджень можна прогнозувати ресурс насосних

штанг та визначати періодичність проведення їх дефектоскопії, що забезпечить раціональне використання насосної штанги та зменшить аварійність при експлуатації свердловин.

3. Розроблене композитне покриття насосних штанг виконує не тільки функцію протикорозійного захисту, але і механічно зміцнює поверхню насосної штанги створенням залишкових напружень стиску.

4. Результати досліджень втомної міцності при згині гібридних насосних штанг представляють практичний інтерес для оцінювання запасів міцності штангових колон і можуть ефективно використовуватися для прогнозування їх ресурсу за багатоциклової втоми.

Ключові слова: насосна штанга, гібридна насосна штанга, склопластик, вуглепластик, напружено-деформований стан, напруження згину, напруження кручення, втома довговічність, тріщини, полімерні композиційні матеріали, поліуретан, бандаж.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 В.В. Kopei, А.В.Stefanyshyn, and Т.Р. Venhrynyuk. Fatigue strength of hybrid pump rods. Material Science. Vol. 54. No. 5 March 2019. P. 739-742. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00240-z> (Scopus)

3 А.В.Stefanyshyn. Restoration of hybrid sucker rods technical characteristics. Modern engineering and innovative technologies. Issue №11, Part 1, March 2020. P. 22-26. (Index Copernicus)

4 Б. В. Копей, А. Б. Стефанишин, Т. П. Венгриянюк. Втомна міцність гібридних насосних штанг. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2018. № 4. С.117-122. <https://rdcu.be/bLN7y> (Scopus)

5 Копей Б.В., Копей В.Б., Мартинець О.Р., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової

насосної установки. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 2 (47). С.62-71.

6 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 1(34). С.120-125.

7 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Склад і властивості асфальтосмолистих речовин. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 2 (51). С.45-50.

8 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Рачкевич І.О. Розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №3(64) . С.50-56.

9 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №4(65). С.20-25.

10 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Нафтогазова енергетика. 2017. № 2(28). С.27-30.

Опубліковані праці апробаційного характеру

11 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Овецький С. О., Стефанишин А.Б. Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2013: Материалы международной научно-практической конференции (Одесса, 18-29 июня 2013)*. Одесса: Куприенко, 2013. Выпуск 2, том 7. С.78-84. (Index Copernicus)

12 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі: Тези доповідей науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012)*. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. С.118-220.

13 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Аналіз методів відновлення відбракованих насосних штанг. *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012*: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Івано-Франківськ, 5-7 листопада 2012). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2018. С.130 – 132.

14 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І., Онищук О.О. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя*: Матеріали доповідей учасників сімнадцятої Всеукраїнської науково-практичної конференції (Запоріжжя, 22-26 жовтня 2012). Запоріжжя: Видавництво ПГА, 2012. С. 124-134.

15 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Аналіз способів ремонту насосних штанг. *Нафтогазова енергетика – 2013*: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2013. С. 134-136.

16 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Аналіз критеріїв Гудмана, Зодерберга і Гербера та розрахунок втомної міцності насосних штанг. *Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку*: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції (Дрогобич, 02-03 березня 2017). Дрогобич. С. 65-68.

17 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017*: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С.135-136.

18 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Втомна міцність гібридних насосних штанг при циклічному розтязі та згині. *Нафтогазова енергетика 2017*: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 121-122.

19 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Порівняльний аналіз

поломок насосних штанг в різних регіонах. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ* (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 117-118.

20 Копей Б.В., Блажків Т.Б., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Контроль руйнування та росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Тези доповідей 6-ої науково-практичної конференції* (Івано-Франківськ, 15-16 листопада 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 30-31.

21 Стефанишин А.Б., Бакун Б.М., Копей Б.В. Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення. *Молодь: наука та інновації: Матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених* (Дніпро, 15-16 листопада 2018). Дніпро, 2018. С. 45-46.

22 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Відновлення властивостей дослідних зразків насосних штанг після експлуатації. *Сучасний рух науки: Тези доп. V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (Дніпро, 7-8 лютого 2019). Дніпро, 2019. С.335-338.

23 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Ремонт насосних штанг після експлуатації. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2019: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції* (Дніпро, 26 – 28 березня 2019). Дніпро: Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. Дніпро: НМетАУ, 2019. С.12.

24 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Контроль мікроструктури насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Тези доповідей 7-ої науково-практичної конференції* (Івано-Франківськ, 19-20 листопада 2019). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу. 2019. С.113-114.

25 Богдан Копей, Василь Михайлюк, Андрій Стефанишин, та інш. Дослідження напруженого стану в з'єднанні гібридних насосних штангах. *XVI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція*, 30 Листопада, 2019р. <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/5266>.

ABSTRACT

Stefanyshyn A.B. Prediction and increasing of sucker rods life with operational damage. - Qualifying scientific work on manuscript rights. The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy for specialty 133 - Industrial Engineering - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2020. The dissertation is devoted to improving the efficiency of sucker rods operational damage based on the use of effective technological process in the process of their repair, which provides their reliability and durability in the process of further operation.

The purpose of the study is to increase the efficiency of sucker rods operational damage using effective technological process in the process of their repair.

To achieve this goal, the following necessary tasks were identified:

1 Analyze the causes of defects in the sucker rods, methods of their control and modern methods of their prevention.

2 Investigate the growth of short cracks of fatigue in the sucker rods, their methods cultivation and inhibition using the developed methods.

3 Determine the fatigue characteristics of the sucker rods with short cracks after use of a protective covering.

4 Improve the method of predicting the durability of sucker rods with operational damage and build a full diagram of their fatigue strength.

5 To determine the effective technological process of sucker rods repair, which would ensure their reliability and durability in the future operation.

The object of research is the process of inhibiting the growth of sucker rod cracks during the mechanized method of oil production using rod downhole pumping units, which slows down development of short cracks that lead to changes in the technical condition of the installation and emergency situations.

Subject of research: methods of preventing cracks development by bandaging and by applying polyurethane coatings on the surface of the sucker rods with operational damage.

To solve the problems next methods were used: reliability theory, methods of mathematical statistics, methods of spectral and correlation analysis, methods of technical diagnostics, complex application of physical, mathematical and computer modeling of research objects for confirmation of the adequacy of the obtained results. To confirm the adequacy of the results obtained in laboratory facilities the experimental methods were applied.

An analysis of the causes and methods of damage control and defects in the sucker rods and patterns of growth of short cracks fatigue in steels was realized. The approaches of linear fracture mechanics, which are widespread, are determined used to assess the resistance to fatigue crack growth as well the expediency of using experimental and theoretical ones is substantiated methods at different stages of research. The method of cultivation and inhibition of growth of short cracks was proposed. The evaluation of the effectiveness of application of the developed modified polyurethane coating of sucker rods according to technical conditions in view of inhibiting the growth of short fatigue cracks was made.

Thus, under the action of cyclic loading of sucker rods, surface short cracks will be due to the load from the internal pressure open and the first layer of coating will fill the cavity of the crack, and then curing will act as a wedge. This is under cyclic loading reduces the cyclic deformation of steel near the crack tip, which leads to increase resistance to the spread of fatigue crack and its inhibition.

The coating applied to the sample additionally creates an antiwear effect, because it has additives and high adhesion to the surface of the magnifying steel protective properties of the coating. Prediction of sucker rods life under the condition of reinforcing is determined by the effect of the developed coating in the case of increased load asymmetry.

The physical and mechanical properties of various protective properties are substantiated and determined coatings. It is determined that the metal-polymer coating has high corrosion resistance and low specific gravity. The method of

covering the sucker rod is proposed and the physical mechanical properties of this coating, which is a structure on base of modified polyurethane.

Based on tests of repair steel and hybrid sucker rods complete diagrams of fatigue failure of sucker rods were constructed with probabilistic estimate $P(N)$ of their durability, which allow realizing the forecasting of their resource. According to the results of obtained fatigue strength diagrams of hybrid sucker rods with cyclic bending in comparable to fiberglass sucker rods were built. By using the developed techniques and computer program we can predict the resource sucker rods as steel, fiberglass and hybrid and justify the frequency of their defectoscopy, which will allow rationally use sucker rods and significantly reduce the accident rate during production oil from wells.

It is offered to use them in the process of rods repairing the strengthening by applying protective modified polyurethane.

The described technology will increase the resource of the repaired sucker rods in the course of their further operation. Also it is proposed to use a combined coating to protect the sucker rods from corrosion, corrosion fatigue, wear resistance.

The estimation of calculation of critical length received the further development crack and durability of sucker rods using MathCAD with taking into account the tangential stresses, as well as the calculation of the residual resource of sucker rod, taking into account the tangential stresses depending on the value of torque applied. The critical crack depth and durability of sucker rods were determined using MathCAD program and taking into account the tangents stresses and a graphical dependence of the durability of the rod from critical crack depth when changing the torque from 50 to 250 N·m was constructed.

Solved one of the main problems - the assessment of the limit state of the elements structures, in particular sucker rods, subject to simultaneous impact static and cyclic loads, especially asymmetric loads.

Restoration of technical characteristics of sucker rods is offered by the method of removing the top layer of metal by turning, i.e. by elimination of existing short cracks formed during operation. On base of the analysis of test results of new and

used in wells sucker rods can be concluded that the application of polyurethane coating increases the durability of the rods several times.

Thus, the strengthening of new and sucker rods that were in operation, allows you to significantly increase the durability of the first and extend the operating time rods that have worked for some time in aggressive environments in petroleum wells. This, in turn, will reduce the consumption of rods put into operation. In the proposed method the problem of repair of a sucker rod is solved and the maximum use of a resource of sucker rods, return to work of a significant part of the rejected rods. Also the task of restoring the technical characteristics of the sucker rod is solved, that is, the elimination of damage that occurs on the surface of the rods in the process of operation, and also strengthening of a sucker rod by a superficial slander. Results experiments show that the proposed method of restoring the rods provides an increase in the limited endurance limit of the samples according to the proposed technology of restoration of rods in 3-4 times. As a result of the surface layer of the products are formed residual compressive stresses that have a good effect on its fatigue strength, and in the central part of the product - residual tensile stresses.

According to the results of analytical and experimental studies the design of connections of fiberglass sucker rods for the purpose is improved increasing the efficiency of their operation. Connection of fiberglass rod with a steel head that has sufficient characteristics of strength and fatigue resistance for use in wells up to 2500 m deep was created.

The scientific novelty of the obtained results is that for the first time:

- proposed and introduced into production the recovery technology of sucker rods, which is to eliminate surface damage that occurs on the surface of the rod during operation (cracks, abrasions, uneven wear of a rod on diameter, damage owing to corrosion), a method machining, and the use of surface slander, which makes it possible to increase the fatigue strength of the rod and its other mechanical characteristics, as well as return a significant part of the used rods to operation.

- the influence of torsional stresses at complex loading of sucker rods is estimated at the stress state of the rod column, by assessing this type of load on the growth of the fatigue crack, which allows you to predict the resource during rotation

of sucker rods rotator and determine the frequency of them defectoscopy, which will ensure trouble-free operation of the well.

- obtained results of values under the action of different bending stresses on the restored repair rods according to the developed technology, due to the conducted tests and appropriate calculations, which made it possible to determine the limit of corrosion fatigue for different diameters of sucker rods.

- received further development of the hybrid recovery sucker rods with cracks, which consists in the imposition of fiberglass bandages (l = 50cm, B = 10cm - 6 layers along the contour of the rod at the place of cracks) and epoxy resin, which makes it possible to extend their life by 15-20% when production of oil from deep wells is applied.

The practical significance of the obtained results.

1. Restoration technology is developed and introduced into production sucker rods, which solves the problem of repairing the rod and the maximum use of sucker rods stock, return to work of a significant part rejected rods and gives great technical and economic advantages over known methods of restoring sucker rods.

2. Using the developed methodology and computer program MathCAD and the obtained research results can be predicted resource sucker rods and justify the frequency of their defectoscopy that will allow to use rods rationally and to reduce accident rate considerably in the production of oil from wells.

3. The developed composite covering of sucker rods carries out not only for corrosion protection function, but also for mechanically strengthens the sucker rod surface by creating residual compressive stresses.

4. The results of studies of fatigue strength in bending of hybrid pumps rods are of practical interest for assessing strength reserves rod columns and can be used to predict their life by multicycle fatigue.

Key words: sucker rod, hybrid sucker rod, fiberglass, carbon fiber, stress-strain state, bending stress, stress torsion, fatigue life, cracks, polymer composite materials, polyurethane, bandage.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ.....	25
1.1 Причини виникнення і методи контролю пошкоджень та дефектів у насосних штангах.....	26
1.2 Закономірності росту коротких тріщин втоми в сталях.....	40
1.3 Аналіз методів прогнозування втомної довговічності насосних штанг.....	42
1.4 Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг.....	44
1.5 Сучасні методи підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними дефектами.....	52
1.6 Висновки до розділу 1	55
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАСОСНИХ ШТАНГ.....	58
2.1 Конструкції зразків насосних штанг.....	59
2.2 Методика контролю росту тріщин втоми в зразках насосних штанг.....	62
2.3 Особливості оцінювання циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів.....	64
2.4 Методика вирощування і гальмування росту коротких тріщин.....	67
2.5 Методика визначення фізико-механічних властивостей захисних покриттів.....	79
2.6 Висновки до розділу 2	83
РОЗДІЛ 3	
ОПІР СТАЛЕЙ ДЛЯ НАСОСНИХ ШТАНГ РОСТУ КОРОТКИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН.....	85
3.1 Побудова кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалів насосних штанг.....	85

3.2	Визначення границі втоми сталі насосних штанг з короткими тріщинами.....	91
3.3	Гальмування росту коротких тріщин нанесенням захисного покриття ...	93
3.4	Висновки до розділу 3	96
РОЗДІЛ 4		
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ		
4.1	Прогнозування ресурсу насосних штанг з короткими тріщинами	99
4.2	Оцінка границі втомної міцності насосних штанг при асиметричному навантаженні.....	107
4.3	Технологічні процеси ремонту насосних штанг та прогнозування їх експлуатаційних можливостей.....	115
4.4	Висновки до розділу 4.....	119
РОЗДІЛ 5		
ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ.....		
5.1	Вибір та визначення ефективності захисного покриття насосної штанги	123
5.2	Переробка відпрацьованих насосних штанг під їх виготовлення.....	133
5.3	Експериментальні дослідження зразків насосних штанг на опір втомі.....	136
5.4	Технологія контролю і результати обстеження насосної штанги.....	143
5.5	Наповнення полімерних композиційних матеріалів.....	151
5.6	Шляхи підвищення ресурсу насосних штанг з полімерних композитів.....	155
5.7	Розроблення з'єднання гібридних насосних штанг.....	162
5.8	Висновки до розділу 5.....	166
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ.....		
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....		
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....		

ВСТУП

Актуальність теми. На даний час питання підвищення надійності та довговічності нафтогазового обладнання набули особливої актуальності. Близько 70% нафтових свердловин в Україні експлуатується штанговими свердловинними насосними установками (ШСНУ). Однією з основних проблем, пов'язаної з експлуатацією свердловин, обладнаних ШСНУ, є частий вихід з ладу насосних штанг (НШ) внаслідок втомного руйнування, викликаного значними циклічними напруженнями, впливом агресивних середовищ, механічним зносом, а також наявністю виробничих дефектів. Внаслідок існуючої технології виготовлення НШ з гарячекатаного прокату на ділянці галтелі штанги з'являється структурна неоднорідність, яка істотно знижує міцність цієї зони. В процесі виробництва штанг всі дефекти, що знаходяться як в тілі прутка, так і на його поверхні (внутрішні і поверхневі дефекти), залишаються.

Статистика показує, що обрив штанг складає 30-40 відсотків від усіх причин виходу з ладу нафтової свердловини. По-перше, ліквідація обриву триває 5-7 днів, що вимагає значних матеріальних витрат. По-друге, це штанги, які підняли із свердловини і перетворили на металобрухт. По-третє, втрати видобутку нафти під час ремонту свердловини.

Продовження терміну служби насосних штанг є одним з актуальних завдань у нафтовому виробництві. Тому потрібно знайти спосіб, який би вирішував завдання ремонту штанги і максимального використання ресурсу штангового прокату, повернення в роботу значної частини відбракованих штанг.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм та 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 "Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення" (номер держреєстрації 0117U003756). Автором

розроблено наукові основи підвищення працездатності насосних штанг шляхом їх відновлення при ремонті та проведено комплекс експериментальних досліджень, а також розроблено принцип керування удосконаленим технологічним процесом ремонту штанг, виконані роботи з визначення межі витривалості і довговічності та прогнозування властивостей ремонтних штанг.

Мета і завдання дослідження. Підвищення працездатності насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями з використанням ефективного технологічного процесу в процесі їх ремонту.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1 Проаналізувати причини виникнення дефектів в насосних штангах, методи їх контролю та сучасні методи їх попередження.

2 Дослідити ріст коротких тріщин втоми в насосних штангах, методи їх вирощування та гальмування за допомогою розроблених методів.

3 Визначити характеристики втоми насосних штанг з короткими тріщинами після використання захисного покриття.

4 Вдосконалити метод прогнозування довговічності насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями та побудувати діаграму їх втомної міцності.

5 Визначити ефективний технологічний процес ремонту насосних штанг, який забезпечував би їх надійність та довговічність в процесі подальшої експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес гальмування росту тріщин насосних штанг під час механізованого способу видобутку нафти з використанням штангових свердловинних насосних установок, що сповільнює розвиток коротких тріщин, які призводять до зміни технічного стану установки та аварійних ситуацій.

Предмет дослідження: методи гальмування тріщин бандажуванням та нанесенням поліуретанових покриттів на поверхню насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями.

Методи дослідження: для вирішення поставлених задач використані методи теорії надійності, методи математичної статистики, методи спектрального та кореляційного аналізу, методи технічної діагностики,

комплексне застосування фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання об'єктів дослідження для підтвердження адекватності отриманих результатів. Для підтвердження адекватності отриманих результатів на лабораторних установках застосовано експериментальні методи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

- запропонована та впроваджена у виробництво технологія відновлення насосних штанг, що полягає в усуненні пошкоджень поверхні, які виникають на поверхні штанги в процесі експлуатації (тріщини, потертості, нерівномірне зношування штанги по діаметрі, пошкодження внаслідок корозії), методом проточування, та використання поверхневого наклепу, що дає можливість підвищити втомну міцність штанги та інші її механічні характеристики, а також повернути значну частину відпрацьованих штанг в експлуатацію.

- проведено оцінку впливу напружень кручення при складному напруженому стані штангової колони, шляхом оцінки цього виду навантаження на ріст втомної тріщини, що дає змогу прогнозувати ресурс при обертанні насосних штанг обертачем та визначити періодичність проведення їх дефектоскопії, що забезпечить безаварійну роботу свердловини.

- отримані результати значень при дії різних напружень згину відновлених ремонтних штанг згідно розробленої технології, через проведені випробування та відповідні розрахунки, що дало можливість визначити межу корозійної втоми для різних діаметрів насосних штанг.

- отримали подальший розвиток перспективи відновлення гібридних насосних штанг з тріщинами, що полягає в накладанні бандажів із скловолокна (скловолокно довжиною 50 см та шириною 10 см накладати в місці виникнення тріщин по контуру штанги в 6 шарів) та епоксидної смоли, що дає можливість продовжити їх ресурс на 15-20% при видобуванні нафти з глибоких свердловин.

Достовірність результатів дисертації забезпечується коректністю постановки задач, використанням обґрунтованих моделей і методів їх розв'язання, постановкою та проведенням експериментальних досліджень які це підтверджують.

Практична цінність:

1. Розроблено та впроваджено у виробництво технологію відновлення насосних штанг, що вирішує завдання ремонту штанги і максимального використання ресурсу нафтового прокату, повернення в роботу значної частини відбракованих штанг та дає великі техніко-економічні переваги в порівнянні з відомими способами відновлення насосних штанг.

2. За допомогою розробленої методики і комп'ютерної програми *MathCAD* та отриманих результатів досліджень можна прогнозувати ресурс насосних штанг та визначати періодичність проведення їх дефектоскопії, що забезпечить раціональне використання насосної штанги та зменшить аварійність при експлуатації свердловин.

3. Розроблене композитне покриття насосних штанг виконує не тільки функцію протикорозійного захисту, але і механічно зміцнює поверхню насосної штанги створенням залишкових напружень стиску.

4. Результати досліджень втомної міцності при згині гібридних насосних штанг представляють практичний інтерес для оцінювання запасів міцності штангових колон і можуть ефективно використовуватися для прогнозування їх ресурсу за багатоциклової втоми.

Особистий внесок здобувача. Матеріали дисертаційної роботи ґрунтуються на результатах теоретичних і експериментальних досліджень, одержаних за безпосередньої участі здобувача. Ідеї, вибір методів дослідження, наукові висновки та положення, винесені на захист, належать особисто автору. В усіх опублікованих працях здобувач брав участь на всіх етапах дослідження: в аналізі та узагальненні літературних даних і постановці завдань, складанні комп'ютерних програм, в обговоренні й інтерпретації одержаних результатів. У дисертації представлено результати досліджень, які автор виконав самостійно або зі співавторами, насамперед, з науковим консультантом д.т.н., проф. Б.В.Копеєм. Автор здійснив апробацію ідей, які одержав як особисто, так і в співпраці з колегами (к.т.н., доц. кафедри нафтогазового обладнання, Михайлюк В.В.; к.т.н., доц. кафедри нафтогазового обладнання Венгринюк Т.П.; к.т.н., доц. кафедри комп'ютеризованого машинобудування Копей В.Б.;

к.т.н., доц. кафедри комп'ютерної інженерної графіки Онишук О.О.; асистент кафедри видобування нафти і газу Мартинець О.Р.; к.т.н., доц. кафедри видобування нафти і газу Овецький С. О.; асп. кафедри будівництва та енергоефективних споруд Рачкевич І.О.; аспірант кафедри нафтогазового обладнання - Юй Шуанжуй).

В опублікованих у співавторстві роботах автором особисто вдосконалено технологію ремонту насосних штанг та проведено аналіз методів відновлення відбракованих насосних штанг [1-4; 6; 7; 11; 23]; запропоновано методи боротьби з асфальтосмолистими речовинами та їх попередження методом нанесенням захисних покриттів на поверхні труб та іншого обладнання [8]; подано рекомендації щодо використання поліуретанових покриттів у процесі ремонту насосних штанг [5]; проведено контроль мікроструктури насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями, розроблено та досліджено технологію холодної правки насосних штанг з поздовжнім навантаженням [9]; проведено оцінку границі втомної міцності насосних штанг при асиметричному навантаженні та проведено розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги [10]; запропоновано метод прогнозування ймовірності ресурсу сталевих та композитних насосних штанг [13; 16]; проаналізовано перспективи застосування гібридних насосних штанг, проведено аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг та досліджено втомну міцність гібридних штанг при циклічних навантаженнях при згині [12; 18; 19]; запропоновано новий спосіб з'єднання гібридних насосних штанг [20]; проведена оцінка запасів міцності гібридних насосних штанг для прогнозування ресурсу за багатоциклової втоми [14; 15]; усвідомив настановам свого наукового консультанта та співавторів, здобувач здійснював пошук й аналіз літератури, формулював постановку задач та генерував ідеї для їх розв'язання [17; 21; 22; 24].

Автор *одноосібно* опублікував:

- у статті [31] розглядаються перспективи застосування гібридних насосних штанг та проведена оцінка їх втомної міцності при циклічному згині.

Проведено аналіз пошкоджень гібридних насосних штанг та розроблена методика заліковування тріщин.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи, її результати та висновки було висвітлено й обговорено на таких наукових конференціях і семінарах: серед них — Науково-технічна конференція «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі» (3-6 жовтня 2012 р., м. Івано-Франківськ, Україна), Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012 (5-7 листопада 2012 р., Івано-Франківськ, Україна), Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (22-26 жовтня 2012 р., Запоріжжя, Україна), Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика – 2013» (7-11 жовтня 2013 р., м. Івано-Франківськ, Україна), Міжнародна науково-практична конференція «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2013» (18-29 червня 2013 р., м. Одеса, Україна), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку», (02 - 03 березня 2017 р., м. Дрогобич, Україна), VI Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика 2017» (15-19 травня 2017 р., Івано-Франківськ, Україна), Науково-практична конференція «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», (15-16 листопада 2017 р., м. Івано-Франківськ, Україна), VI Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Молодь: наука та інновації", (15-16 листопада 2018 р., м. Дніпро, Україна), V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, (7-8 лютого 2019 р., м. Дніпро, Україна), Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ'2019» (26 – 28 березня 2019 р., м. Дніпро, Україна), VII Науково-практична конференція "Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання", (19-20 листопада 2019 р., м. Івано-Франківськ, Україна), XXI Міжнародна науково-

практична інтернет-конф., (30 Листопада, 2019 р., <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/5266.>).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 25 наукових праць, серед них: одна монографія [24], 7 статей у фахових виданнях України [4; 5; 8; 16; 18; 19; 20], і 1 зарубіжна публікація [31], із яких 3 включено до міжнародних наукометричних баз (1 статтю проіндексовано базами Scopus [15], 2 – Index Copernicus [31; 7]); 1 стаття у матеріалах конференцій [10]. Окрім статей, дисертаційні результати стисло містяться ще й у 15 тезах [1]- [3], [6; 7], [9], [14], [17], [21]–[23], опублікованих в збірниках матеріалів вищезазначених конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, п'ять розділів, загальні результати і висновки, список використаних джерел та один додаток. Роботу викладено на 182 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту дисертації складає 170 сторінки. Роботу проілюстровано 60 рисунками та 17 таблицями. Список використаних джерел містить 114 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ

Для забезпечення життєдіяльності людству необхідно все більше нафти. У найближчій перспективі об'єми споживаної нафти будуть тільки рости, а це змушує вирішувати питання видобутку нафти з більшою відповідальністю, ефективно використовувати діючі родовища та грамотно розробляти нові. Постійно зростають глибини свердловин для видобування нафти і це викликало проблему підйому її на поверхню. Розвиток глибинно-насосного методу видобутку нафти і газу йде по шляху постійного покращення характеристик міцності насосних штанг і насосно-компресорних труб, підвищення зносостійкості і точності поверхонь плунжера і циліндра глибинних насосів, модернізації його клапанних вузлів, збільшення потужності і вантажопідйомності приводу (верстата - качалки). Проведена і постійно проводиться робота з підвищення надійності обладнання, але ще є багато проблем. Зокрема, це стосується насосних штанг. Питання підвищення надійності насосних штанг є актуальним і дуже важливим. З метою економії трудових і фінансових ресурсів необхідно знайти правильне вирішення завдання, пов'язаного, з одного боку, з недопущенням виходу з ладу насосних штанг та з іншого боку – подовженням терміну експлуатації кожної штанги.

Продовження терміну експлуатації насосних штанг є однією з важливих завдань у нафтогазовидобутку. Насосні штанги в процесі експлуатації набувають різного роду дефекти: тріщини по тілу штанги, зношування галтельної частини, різного роду корозійні пошкодження та ін. Тому, потрібно знайти метод, який би вирішував питання якісного ремонту насосної штанги і максимального використання штангового прокату та повернення в експлуатацію значної частини відпрацьованих насосних штанг.

Одним з найбільш ефективних і простих методів подовження ресурсу роботи свердловини є підвищення надійності та довговічності насосної штанги.

Сервісне обслуговування включає приймальний неруйнівний контроль тіла штанги та зміцнення галтельної ділянки.

1.1 Причини виникнення і методи контролю пошкоджень та дефектів у насосних штангах

Колона насосних штанг є одним із найбільш слабких елементів свердловинної штангової насосної установки (ШСНУ) та експлуатується в складних умовах. Як уже зазначалось, у свердловині, на неї діє сукупність значних циклічних та динамічних навантажень. Механічні та корозійні фактори безпосередньо є причинами відмов у процесі експлуатації колони насосних штанг.

Дослідження характеру руйнування насосних штанг на різних родовищах підтвердили, що більше 90 % обривів у колоні насосних штанг буває в результаті корозійно-механічного руйнування, які виникають в результаті таких факторів:

- втома металу штанги під дією навантаження;
- корозія металу штанги в агресивних пластових рідинах;
- спрацювання елементів колони штанг в результаті сумарного впливу сил тертя (граничного, гідродинамічного та інших); до найбільш суттєвими є сили, що виникають при терті колони насосних штанг із внутрішньою поверхнею насосно-компресорних труб (НКТ);
- технологічні дефекти металу (прокату), а саме: дефекти при виготовленні прокату заготовки; штампуванні головок штанги; термічній та механічній обробці;
- механічні пошкодження при транспортуванні, зберіганні, проведенні спуско-піднімальних операцій (СПО) та інших роботах;
- пластичні деформації металу штанги в результаті прикладення значних зусиль при аварійних ситуаціях;

- невідповідність колони штанг заданим умовам експлуатації (матеріал, діаметр штанг і довжина секцій компоновки низу колони, засоби та методи від корозійно-механічних руйнувань);

- відкладення на насосних штангах парафіно-смоляних речовин і солей та наявність в пластових рідинах механічних домішок.

Всі поломки насосних штанг і муфт можна поділити на руйнування під дією осьових навантажень розтягу і поломки від втоми металу [2; 24; 25]. Руйнування під дією зусиль розтягу відбувається тоді, коли навантаження перевищує границю міцності матеріалу штанги. Навантаження концентрується в одній точці колони штанг, створюючи зусилля розтягу на поверхні штанги, і руйнування відбувається в тому місці, де поперечний переріз найменший. Цей вид руйнування характерний тільки в тих випадках, коли на колону насосних штанг діє значне навантаження, в процесі роботи свердловинного насоса. Для уникнення обривів насосних штанг необхідно, щоб максимальне зусилля від дії їх ваги не перевищувало 90% границі міцності матеріалу в поперечному перерізі штанги з найменшим діаметром. Всі інші пошкодження насосних штанг - це пошкодження, спричинені втомою матеріалу штанги.

Пошкодження від втоми матеріалу відбуваються з певним наростанням і починаються з малої тріщини, яка постійно збільшується під дією циклічного навантаження. Навантаження, що є причиною такого пошкодження, має максимальне значення, яке є набагато меншим за границю міцності чи границю плинності матеріалу насосної штанги. Оскільки навантаження на колону насосних штанг розподіляється приблизно однаково по всьому її тілу, то будь-яке пошкодження в області поперечного перерізу тіла штанги збільшить навантаження в точці пошкодження, і тому це місце буде концентратором напружень. Втомна тріщина малого розміру формується в точці, тобто в концентраторі напружень і поширюється перпендикулярно до лінії дії навантаження або осі тіла насосної штанги. Втомна тріщина під дією циклічного навантаження поступово збільшується, спряжені поверхні зламу мають гладку і поліровану поверхню та під дією навантаження то віддаляються, то наближаються. Так як глибина втомної тріщини збільшується, при цьому

зменшується площа поперечного перерізу насосної штанги до того моменту, поки вона витримує навантаження, і в результаті насосна штанга руйнується. Поверхні руйнування від втоми мають три зони: 1) зону поступового розвитку тріщини, 2) зону деформацій від зусилля розтягу, 3) руйнування. [27 ; 25]

Втомні руйнування виникають через різні концентратори навантажень. Концентратори навантажень - це видимі або мікроскопічні виїмки, які є причиною зростання напруження, під дією навантаження на колону штанг. Типові видимі концентратори навантажень на насосних штангах і муфтах - це тріщини, корозія, згин, пошкодження різьби, механічні пошкодження, місця зносу або будь-яка комбінація цих пошкоджень. Небезпека руйнування є найбільш критичною, коли на колону насосних штанг діють навантаження, перпендикулярні до основного навантаження розтягу. Для того щоб виявити концентратори навантажень після руйнування місце розриву насосної штанги потрібно ретельно очистити і уважно оглянути. Полумки від втомного руйнування мають видимі особливості на поверхні зламу, які допомагають визначити розташування концентратора навантажень. Є три найхарактерніші ознаки в ідентифікації полумки від втоми це «береги», «бороздки» і «сколи». «Береги» являють собою лінії, які походять від перетину до з'єднання втомних тріщин. «Бороздки» вказують напрямок просування втомної тріщини. «Береги» паралельні до основного напрямку росту тріщини і напрямлені до початкової точки руйнування. «Бороздки» виглядають як еліптичні або напівеліптичні кільця, що розходяться від початку перелому і вказують наступні положення росту втомної тріщини. Скольні ділянки руйнування насосної штанги характеризують її крихкі механізми.

На рисунку 1.1 зображено приклади руйнування від розтягу і втоми. Два зразки справа – це руйнування від надмірних зусиль розтягу. Таке руйнування розтягу характеризується зменшенням у діаметрі поперечного перерізу в точці зламу. Другий зразок справа типовий для полумок розтягу, полумки від розтягу мають конусні кінці частин розриву. Руйнування спричинене розтягом відбувається під кутом 45° до прикладеного зусилля має вигляд малої, напівеліптичної втомної тріщини. Можна сказати, що ця насосна штанга мала

перед використанням поперечні втомні тріщини через внутрішнє напруження. Одна з внутрішніх втомних тріщин утворилася під дією постійного навантаження, яке діяло на штангову колону під час експлуатації. Руйнування від напруження розтягу вторинне і призводить до утворення нестандартного вигляду поверхні руйнування з невеликою частиною втомного руйнування, великою частиною руйнування розтягу і дуже великою частиною подвійного руйнування під кутом 45°.



Рисунок 1.1 - Поломки від розтягу і втоми насосних штанг

Решта зразків зображених на рис. 1.1 - це втомні поломки насосних штанг з поверхневим зміцненням; насосні штанги, які пройшли нормалізацію і відпуск; насосні штанги, які пройшли гартування та відпуск. Крайній лівий зразок - це руйнування втоми від деформації кручення. «Береги», що знаходяться у великій частині зони втоми, покрили поверхню зламу з малою розтяжною частиною розриву, що знаходиться майже по центрі. Другий зразок зліва - це втомне руйнування штанги з поверхневим зміцненням струмами високої частоти. Зміцнений поверхневий шар металу тіла насосної штанги несе основне навантаження всієї насосної штанги, і якщо є пошкоджений поверхневий шар, то значно зменшиться міцність насосної штанги в цілому. Тріщина, що зародилася внаслідок втоми перетинає зміцнений поверхневий шар штанги і збільшується в глибину крізь її тіло. Поверхня втомного руйнування насосної штанги з поверхневим зміцненням загалом складається з малої частини зони втоми і великої частини зони розриву від зусиль розтягу. Третій зразок зліва є типовим прикладом поломок від втоми. Поверхні

втомного руйнування мають частину зони втоми, частину зони розтягу і руйнування тіла. Ширина частини зони втоми вказує на величину навантаження, яке діяло під час руйнування штанги. Механічні пошкодження можуть перешкодити визначенню типу руйнування за рахунок знищення візуальних ознак, що є на поверхні руйнування. Для визначення типу руйнування огляд необхідно здійснювати відразу після підняття із свердловини зруйнованої штанги. Дуже важливо зберігати розірвані частини штанги разом, оскільки це дає можливість визначити особливості розірваних поверхонь. Поверхні злому не повинні торкатися між собою під час зовнішнього обстеження, тому потрібно уникати механічного пошкодження поверхонь.

Із всіх поломок колони штанг великий відсоток складають механічні руйнування, які включають всі типи руйнувань, окрім виробничих дефектів і корозійної втоми. Причиною механічного пошкодження колони штанг є концентратор навантажень, який викликає поломки насосних штанг. Причинами руйнування є багато факторів: максимальне навантаження, розміщення пошкодження, робоче середовище, хімічний склад матеріалу насосної штанги, вид термічної обробки насосної штанги, діапазон навантажень і вид пошкодження. Також механічні пошкодження можуть виникнути через помилки в металокопструкції штангової свердловинної насосної установки (ШСНУ); недбалого обслуговування і транспортних операцій; неточності монтажних робіт; застарілих технологічних процесів; або будь-яких інших причин.

Руйнування від напружень згину складають значну частину від кількості всіх механічних поломок. Також незаперечним фактом є те, що всі зігнуті насосні штанги в решті-решт ламаються. Норма відхилення від прямолінійності тіла нових насосних штанг не перевищує 1,5 мм на 3-х метрах довжини насосної штанги. Згин штанги більший від допустимого, буде причиною зростання напруження в точці згину під час дії навантаження. Коли викривлене тіло насосної штанги розтягується під дією навантаження, тоді в окремих місцях штанги швидко виникає границя міцності матеріалу. Цикл постійного перевищення границі міцності матеріалу штанги повторюється протягом циклу

роботи насосної установки і спонукає до утворення втомних тріщин на внутрішній стороні згину. Під дією навантаження втомні тріщини збільшуються в перпендикулярному напрямку до осі насосної штанги, до того моменту, поки тіло штанги витримує навантаження, після чого відбувається злам. [27 ; 25]

Вирівнювання прокату заготовки - це перший крок в процесі виготовлення насосні штанги. Вирівнювання прутка в холодному стані деформує структуру металу при температурі нижче температури рекристалізації. При цьому, крім вирівнювання прутка, також досягається ефект зміцнення матеріалу. Для зняття залишкових і індукційних напружень під час виготовлення штанги, викликаних прокатуванням, вирівнюванням та штампуванням прутка проводиться термічна обробка, яка змінює структуру металу кованих кінців насосної штанги до однорідності з тілом штанги, а також покращує механічні властивості насосної штанги. Згин тіла штанги після термічної обробки є наслідком виникнення областей з різною твердістю та є причиною виникнення концентраторів навантажень. Можна провести механічну обробку, тобто проходження виготовленої насосної штанги через систему валків та вирівняти згин, після чого насосна штанга стає майже ідеально рівною. Проте, існуючі технологічні процеси відновлення не придатні для насосних штанг, які були в експлуатації і були зігнуті в процесі їх роботи в свердловині. Зігнуті насосні штанги не повинні використовуватися, тому що вони вкінці-кінців ламаються.

На рис. 1.2 та рис. 1.3 наведені приклади поломок втоми зігнутих насосних штанг. Характерною ознакою втомних поломок зігнутих штанг є скісна поверхня зламу, яка нахилена до осі тіла штанги під кутом, відмінним від 90° . Лівий зразок на рис. 1.2 і рис. 1.3 ілюструє злам, викликаний великим радіусом згину тіла насосної штанги. Поверхня зламу має невеликий кут нахилу до осі тіла насосної штанги. Середній взірець на рис. 1.2 і правий взірець на рис. 1.3 - це поломка від малого радіусу згину. Поверхня зламу знаходиться під більшим кутом нахилу до осі тіла насосної штанги з малою частиною зони втоми і великою частиною руйнування від розтягу. Взірець, що знаходиться справа (рис. 1.2) є наслідком згину насосної штанги, що рухалася по спіралі. Чим

більший згин тіла насосної штанги, тим більше вигнута поверхня зламу. На практиці період часу від згину до руйнування штанги дуже короткий. Причиною згину штанг є недбале транспортування, зберігання і технічне обслуговування.

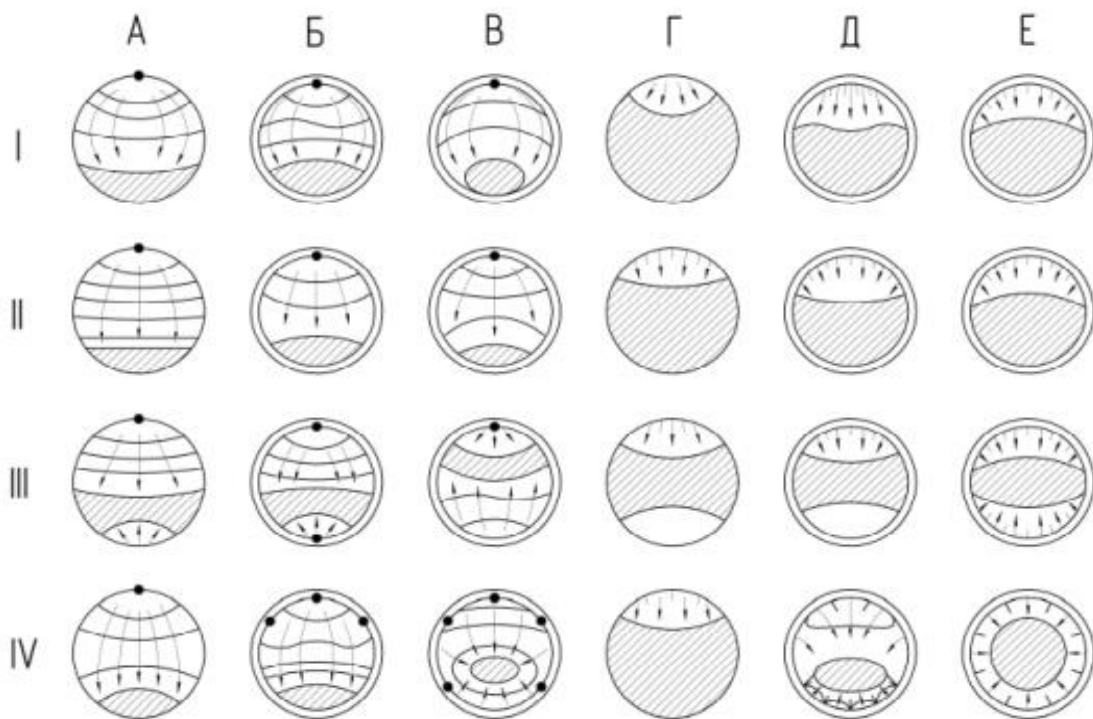
Втомні злами деталей при різних видах навантаження мають певні ознаки, які наведені на рис.1.4.



Рисунок 1.2 - Втомні злами зігнутих насосних штанг



Рисунок 1.3 - Втомні злами зігнутих штанг (вид з боку)



I - розтяг; II - односторонній згин; III – двосторонній згин; IV – згин в процесі обертання

А,Г - локальний концентратор; Б,Д - слабкий концентратор по периметру; В,Е – сильний концентратор по периметру; А,Б,В – помірні номінальні напруження; Г,Д,Е - високі номінальні напруження

Рисунок 1.4 - Класифікація втомних зламів при різних видах навантаження

Зібрані дані (таблиці 1.1-1.4) з поломок насосних штанг в Україні та отримані дані з літературних джерел в США [3; 25] показують, що в основному є співпадання кількості поломок насосних штанг по видах, або ця різниця невелика (7,6 - 9,2%).

Таблиця 1.1 – Обриви насосних штанг та втрати нафти за 2015р в НГВУ „Долина нафтогаз”

№	Родовище	Глибина обриву,м	Діаметр обірваних насосних штанг	Характер обриву	Середня тривалість ремонту, діб	Втрати нафти, тонн
1	Долинське	344	22	Обірвана муфта	4	0,44
2	Північно-Долинське	1000	19 зі скребками	Несправна муфта	4	10,44
3	Долинське	1200	22	Обрив по тілу	4	15,96
4	Долинське	236	22	Обрив по тілу	4	13,72
5	Долинське	760	22	Обірвана муфта	4	26,28
6	Долинське	1128	22	Зрізана різьба в ніпелі	4	22,12
7	Півн-Долинське	630	19	Обрив по тілу	4	5,6
8	Долинське	1288	19	Обірвана муфта	4	4,12
9	Долинське	296	22	Тріснута муфта	4	7,6
10	Долинське	624	22	Обрив по тілу	4	5,4
11	Долинське	216	25	Пошкоджена різьба у муфті	4	22,36
12	Долинське	0	25 поліршток	обірвана різьба	4	19,6
13	Долинське	376	22	зрізана різьба у муфті	4	33,92
14	Долинське	0	25пш	обрив штока	4	8,28
15	Долинське	0	25пш	обрив штока	4	8,36
16	Долинське	568	22скр	обрив по тілу	4	
17	Долинське	72	22	обрив муфти	4	9,16
18	Долинське	440	22	тріснута муфта	4	9,24
19	Долинське	0	25 поліршток	обрив штока	4	9,28

Продовження таблиці 1.1

20	Долинське	1496	22	протерта муфта	4	9,4
21	Долинське	0	25 поліршок	обрив штока	4	9,52
22	Долинське	120	22	по тілу	4	11,12
23	Півн-Долинське	1390	19	обірвана різьба	4	11,08
24	Долинське	1770	19	обрив муфти	4	11,04
25	Долинське	1350	22	обрив муфти	4	9,56
26	Долинське	1456	19	вирвано з муфти	4	8,44
27	Долинське	106	22	муфта	4	8,28
28	Північно-Долинське	1390	22	протерта муфта	4	7,44
29	Долинське	697	22	обрив муфти	4	7,36
30	Долинське	1313	25	обрив по тілу	4	7,28
31	Долинське	40	25	обрив муфти	4	5,96
32	Долинське	480	22	по тілу	4	5,6
33	Долинське	464	22	по тілу	4	5,52
34	Долинське	115	25	на різьбі	4	4,48
35	Долинське	1501	19	протерта муфта	4	4,32
36	Долинське	1616	19	по тілу	4	2,96
37	Долинське	уста	25		4	
38	Долинське	472	22	обрив муфти	4	1,96
39	Долинське	530	22	обрив муфти	4	1,28
40	Долинське	уста	25	по тілу	4	23,88
41	Долинське	уста	25	по тілу	4	23,68
42	Долинське	1500	19	муфта	4	20,52
43	Півн-Долинське	115	22скр	по тілу	4	19,44
44	Долинське	356	22	Обірвана муфта	4	12,12
45	Долинське	1400	19скр	Несправна муфта	4	11,68

Продовження таблиці 1.1

46	Долинське	1300	22	Обрив по тілу	4	11,04
47	Долинське	286	22	Обрив по тілу	4	13,72
48	Долинське	750	22	Обірвана муфта	4	26,28
49	Долинське	1188	22	Зрізанарізьба в ніпелі	4	10,8
50	Долинське	730	19	Обрив по тілу	4	10,44
51	Долинське	1188	19	Обірвана муфта	4	9,8
52	Долинське	496	22	Тріснула муфта	4	9,52
53	Долинське	824	22	Обрив по тілу	4	9,4
54	Долинське	521	25	погана різьба у муфті	4	9,28
55	Долинське	0	25 пш	обірвана різьба	4	9,24
56	Долинське	386	22	зрізана різьба у муфті	4	9,16
57	Долинське	0	25пш	обрив штока	4	9,16
58	Долинське	0	25пш	обрив штока	4	8,92
59	Долинське	624	22скр	обрив по тілу	4	8,7
60	Долинське	158	22	обрив муфти	4	8,6
61	Долинське	215	22	тріснута муфта	4	8,56
62	Долинське	0	25пш	обрив штока	4	8,36
63	Долинське	1396	22	протерта муфта	4	8,28
64	Долинське	0	25 пш	обрив штока	4	8,12

Таблиця 1.2 - Обриви насосних штанг за 1979 –2015 роки в НГВУ
„Долина нафтогаз”

Характер обриву	Роки								
	1979	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
Обрив									
– по тілу	66	93	75	45	46	31	37	37	
– по різьбі	18	30	48	56	36	37	27	16	
– по штоку	30	23	32	49	41	23	21	33	
– по муфті	6	13	13	15	10	13	14	18	
Відгвинчування штанг	2	6	19	22	38	16	7	5	
Всього	122	165	187	187	171	120	106	109	
Характер обриву	Роки							Загалом	%
	1989	1990	1991	1992	1993	2014	2015		
Обрив									
– по тілу	40	31	77	60	63	28	18	753	36,03
– по різьбі	31	30	33	30	25	32	9	458	21,91
– по штоку	27	19	48	30	33	19	8	436	20,86
– по муфті	21	16	24	27	24	37	27	278	13,3
Відгвинчування штанг	12	4	7	12	10	3	2	165	7,8
Всього	131	100	189	159	161	119	64	2090	100,0

Таблиця 1.3 - Обриви насосних штанг за 2008 – 2016 роки в НГВУ „Бориславнафтогаз”

Характер обриву	Роки										Загалом	
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	шт.	%	
Обрив												
– по тілу	22	20	10	28	32	22	18	19	10	181	42,1	
– по різьбі	15	12	4	16	13	18	12	8	7	105	24,42	
– по штоку	12	6	-	4	11	5	-	-	5	43	10	
– по муфті	-	8	4	6	7	8	10	8	9	60	13,95	
Відгвинчування штанг	3	4	2	3	3	9	9	8	-	41	9,53	
Всього	52	50	20	57	66	62	49	43	31	430	100,0	

Таблиця 1.4 - Обриви насосних штанг на промислах США (Пермський басейн) [3; 25]

Характер обриву	Роки					Загалом	%
	1992	1993	1994	1995	1996		
Обриви:							
– по тілу	385	266	179	219	191	1240	34,5
– по різьбі	263	205	119	106	87	780	21,7
– по штоку	147	76	117	47	34	421	11,7
– по муфті	225	142	79	92	68	606	16,9
Відгвинчування штанг, інші відмови	192	132	97	65	59	545	15,2
Всього	1212	821	591	529	439	3592	100

Аналіз показує, що кількість пошкоджень та різниця між кількістю пошкоджень в НГВУ «Долинанфтогаз» та в фірмах США складає:

для тіла штанг – $36,0\% - 34,5\% = 1,5\%$,

для різьби – $21,9\% - 21,7\% = 0,2\%$,

для полірованого штока – $20,9\% - 11,7\% = 9,2\%$,

для муфт – $13,3\% - 16,9\% = 3,6\%$ (гірші показники в США),

інші відмови – $7,8\% - 15,2\% = 7,4\%$ (гірші показники в США).

Аналіз показує, що кількість поломок та різниця між кількістю пошкоджень в НГВУ «Бориславнафтогаз» та в фірмах США складає:

для тіла штанг – $42,1\% - 34,5\% = 7,6\%$,

для різьби – $24,42\% - 21,7\% = 2,72\%$,

для полірованого штока – $10\% - 11,7\% = 1,7\%$ (гірші показники в США),

для муфт – $13,95\% - 16,9\% = 2,95\%$ (гірші показники в США),

інші відмови – $9,53\% - 15,2\% = 5,67\%$ (гірші показники в США).

На сьогодні відомо такі методи неруйнівного контролю стану матеріалів: ультразвукова дефектоскопія і рентгенівська радіографія. Вони забезпечують вибірковий контроль в окремих зонах матеріалу насосної штанги, виявляючи значні дефекти, і не дають інформацію про дрібні дефекти і те, наскільки небезпечним може бути виявлений дефект. Дефект може бути небезпечним в залежності від його місця знаходження в місці напруження, що виникає при навантаженні матеріалу насосної штанги. На відміну від вищезгаданих методів, метод акустичної емісії (АЕ) володіє високою чутливістю, можливістю виявити і стежити за поведінням дефектів, що розвиваються та заснований на випромінюванні матеріалом при його деформуванні пружних механічних хвиль, джерелом яких є дефекти. Метод акустичної емісії дозволяє контролювати стан матеріалу без сканування, простий у використанні в процесі випробувань, виробництва й експлуатації, а також дає можливість контролювати різноманітні матеріали, як однорідні, так і неоднорідні, у тому числі і композити.

Для підтримання насосних штанг в робочому стані в процесі експлуатації потрібно забезпечувати якісне технічне обслуговування, слідкувати за виконанням правил експлуатації обладнання, вказаних у технічних умовах.

Удосконалення технологічних процесів в процесі ремонту насосних штанг

має велике значення для підвищення ресурсу роботи насосних штанг.

Через значні дефекти насосних штанг в процесі експлуатації велика їх кількість вибраковується. Тому потрібно знайти більш прогресивні технологічні методи ремонту, які б забезпечували надійність роботи відновлених насосних штанг [24; 25, 27, 54,57].

1.2 Закономірності росту коротких тріщин втоми в сталях

Одною з найпоширеніших причин руйнування конструкцій є поступовий ріст невеликих тріщин аж до досягнення ними критичної довжини. Відбувається уповільнене руйнування, яке закінчується катастрофічним крихким руйнуванням в умовах невисоких робочих напружень. Відбувається таке руйнування, якщо вчасно не проведена зупинка та своєчасний ремонт конструкції. До руйнування конструкції з тріщиною яка розвивається в період її експлуатації проходить певна частина часу.

Для різних матеріалів механізми виникнення тріщини різні, які залежить від навантаження, умов експлуатації і т.п. Найчастіше уповільнене руйнування виникає через втомне руйнування при дії агресивного середовища, в умовах повзучості. Тому при дослідженні уповільненого руйнування в першу чергу потрібно звертати увагу на вивчення росту тріщин, оскільки саме такі тріщини викликають велику концентрацію напружень, які активізують усі процеси початку руйнування. На початковій стадії такого процесу руйнування майже завжди спостерігається поява і накопичення мікродефектів, розміри яких можна порівняти з характерними розмірами мікроструктури матеріалу (наприклад, величиною зерна). Такий період називається зародженням тріщини або інкубаційним періодом та закінчується локалізацією процесу розсіяного руйнування з появою макротріщини, що постійно зростає. Переважно основну частину часу експлуатації виробу займає не інкубаційний період, а період повільного росту тріщини від початкового до критичного розміру [32 ; 35; 68].

За допомогою кривої Велера можна зробити висновок про довговічність конструкції що дозволяє прогнозувати ресурс до повного руйнування. Проте за

допомогою кривої не можна отримати інформацію про повільний розвиток тріщин в цьому процесі, хоча саме ріст втомних тріщин до критичного розміру веде до руйнування елементів циклічно навантажених конструкцій. Основною причиною руйнування насосних штанг є вплив багатоциклової втоми, де зона пластичних деформацій не є малою, та для опису процесу росту тріщини потрібно розглядати послідовність кроків збільшення навантаження і росту тріщин. Важливим є те, що за кількістю циклів змінного навантаження на стадії зростання тріщини можна визначити довговічність конструкції (тобто, визначити кількість циклів при збільшенні довжини тріщини від початкового значення до критичного). З практичної точки зору така оцінка довговічності важлива при розрахунку ресурсу конструкції. Ріст втомної тріщини відбувається в зоні пружних деформацій, коли справедливі критерії лінійної механіки руйнування.

При малоцикловій і багатоциклової втоми закономірності механізму втомного явища різні. В одному випадку тріщина йде по тілу зерна, в іншому — по його границі. Тому характеристики втомної міцності конструкції повинні залежати від структури матеріалу.

У усіх напрямках об'ємні дефекти мають значну протяжність. Прикладами таких дефектів є різного роду усадочні, газові раковини, тріщини, що утворилися на різних етапах технологічного процесу виробництва металу та прокату. Існують різні методи вивчення кристалічної будови металів в масштабах зерен і їх комплексів. Розміри зерен металу можуть коливатися в межах 0,0001-0,1 см. Тому в деяких випадках дати оцінку кристалічної будови металу можна дати на основі огляду неозброєним оком або при малих збільшеннях. Макроаналіз використовують для встановлення значних дефектів металу, розташування волокон, що викликане відповідними технологічними процесами. Для встановлення причини руйнування використовують макроаналіз поверхні руйнування деталей. Для вивчення мікроструктури металу (утворення тріщин, розташування зерен та т.п.) застосовують мікроструктурний аналіз, в якому використовуються електронні мікроскопи [32, 34, 57, 65, 66, 74].

1.3 Аналіз методів прогнозування втомної довговічності насосних штанг

Насосні штанги в процесі експлуатації піддаються всім видам навантаження: розтягу, згину, крученню та стиску. Насосні штанги в процесі експлуатації у разі перевищення граничних навантажень та в залежності від їх довжини можуть втратити стійкість та зруйнуватися. Тому актуальним завданням є дослідження допустимих меж навантаження насосних штанг в процесі експлуатації. Зазвичай, прогнозування довговічності конструкції здійснюють на основі експериментальних досліджень окремо для кожного виду навантаження, максимально наближених до умов експлуатації. Тому, для кількісної оцінки довговічності матеріалу необхідна розробка експериментальних пристроїв і методів для проведення статичних випробувань насосних штанг із полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) [25; 34 ; 41].

Міцність та довговічність ПКМ досліджували Журко С.Н., Бартінев Г.М., Роценс К.А., Скудра А.М., Степанов В.А., Булавс Ф.Я., Ратнер С.Б., Ярцев В.П., Регель Р., Слуцкер А.І., Петров В.А., Іванова І.М., Петров М. Г.

Фізичні основи довговічності матеріалів відображає кінетична концепція руйнування, заснована на систематичних дослідженнях співробітників Фізико - технічного інституту і м. А. Ф. Іоффе АН СРСР на початку 1950-х років. Для багатьох матеріалів (металів, полімерів, скла, гірських порід і т.д.) Журковим С.Н., Бартенєвим Г.М., Скудрою А.М., Ратнером С.Б., Булавсом Ф.Я. та іншими дослідниками запропоновані емпіричні вирази для обробки результатів і прогнозування довговічності. На практиці застосовуються параметричні методи, в результаті яких за прискореним випробуванням тривалістю кілька годин при різних температурах, застосовуючи принцип температурно-часової суперпозиції, за відомими залежностями екстраполюють результати випробувань на 50 років і більше.

Стандартні методи випробувань мають ряд недоліків, головний з яких - залежність результатів вимірювань від форми та розмірів зразків і способів з'єднання тіла склопластикової насосної штанги із металевою головкою.

Різниця у вимірюванні показників міцності і модулів пружності складає неприпустимі десятки відсотків. Особливо проблемними є випробування на циклічну витривалість, втомну міцність, вплив температури на міцнісні показники при роботі на втому. Використання стандартних методів для випробувань зразків насосних штанг часто вказує на проблеми з'єднання з металевою голівкою насосної штанги, усередині якої або по межі відбувається руйнування під дією контактних напружень [2; 17; 24; 34].

Методи втомних випробувань насосних штанг із ПКМ не стандартизовані. Найбільш близьким аналогом є ГОСТ 10145-81, що регламентує метод втомних випробувань металів під дією постійних навантажень розтягу при постійній температурі до 1200 °С, а також патент РФ № 2167404, МПК7 G01N3/00 на спосіб визначення втомної міцності. В результаті випробувань матеріалу встановлюється залежність між навантаженням на взірець і часом до руйнування при заданій постійній температурі. За результатами випробувань певної кількості зразків для трьох різних значень навантаження визначають середнє значення часу до їх руйнування. За допомогою цих графіків екстраполяції визначають границю втомної міцності матеріалу, де термін служби не повинен перевищувати максимальне середнє значення часу до руйнування більш, ніж на один-півтора порядки. Цей метод визначає температурно-часову залежність міцності металу, а також визначає жароміцність при підвищеній температурі. Поняття таке як жароміцність для ПКМ відсутнє, і верхня межа температурного діапазону експлуатації виробів обумовлена переходом полімерної матриці композита зі твердого стану в високоеластичне. Дослідження втомної міцності ПКМ відзначають великий діапазон значень довговічності в межах однієї вибірки зразків, що перешкоджає використанню методики ГОСТ 10145-81 для тривалих випробувань насосних штанг із ПКМ і отримання усереднених результатів. У літературі описані кілька пристроїв для тривалого випробування матеріалів на розтяг (пат. RU 2219520, МКИ G01N 3/08; RU 2141636, МКИ G01N 3/08), які містять станину та встановлений на ній механізм навантаження, виконаного у вигляді двох захватів для кінців зразка і важеля, пов'язаного з одним із захватів вантажу,

закріпленого на кінці важеля та двох кінцевих вимикачів, пов'язаних з важелем і механізмом компенсації подовження зразка [24].

Також відомі установки, в яких навантажувальний механізм виконаний на основі гідроциліндрів, що збільшує габарити установок і ускладнює процес тривалих випробовувань.

Розробці нових і вдосконаленню раніше створених методів випробувань анізотропних ПКМ присвячена велика кількість робіт, але позитивні результати не знайшли широкого розповсюдження. Це відбувається через складність, високу вартість та значні затрати на виготовлення зразків і оснащення для випробувань, Це робить запропоновані способи і установки малоприматними для масових випробувань при контролі серійної продукції.

Для розвитку науково-технологічного комплексу нафтової промисловості України у даний час технології створення та дослідження виробів з ПКМ мають пріоритетне значення. Через реалізацією нових технологій виготовлення та розширенням номенклатури ПКМ, випробування зразків зменшується з кожним роком. Тому, на сьогодні потребує суттєвого удосконалення «інструмент», за допомогою якого можна чітко характеризувати механічні властивості новостворюваних композитів, а також прогнозувати зміну цих властивостей в процесі експлуатації і порівнювати їх із зарубіжними і вітчизняними аналогами. У зв'язку з цим на сьогоднішній день актуальним завданням є розробка нових комплексних методів прогнозування залишкового ресурсу насосних штанг із ПКМ [26, 46, 76, 98].

1.4 Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг

Незважаючи на значний прогрес у вдосконаленні штангових установок, вони в недостатній мірі відповідають сучасним вимогам їх експлуатації. Тому розроблення нових технологій для відновлення технічних характеристик насосних штанг є важливим завданням. Потрібно знайти таку технологію ремонту, яка б забезпечувала їх ефективне повторне використання.

На даний час не досліджувалися штанги які були в експлуатації, зокрема

зміцнення їх матеріалу, технологічні режими відновлення первісної геометрії та методів контролю і не визначалися фізико-механічні та експлуатаційні властивості їх матеріалу.

Завдяки впровадженню нових технологій необхідно забезпечити ефективну роботу елементів свердловинного штангового обладнання, покращити показники їх функціонального призначення та технічні характеристики насосних штанг, що були в експлуатації.

Під час роботи в свердловині визначати стан зокрема кожної насосної штанги є не можливим через їх велику кількість, так як одна штангова колона у свердловині містить до декілька сотень штанг. Тому потрібно створювати ділянки з ремонту глибинно-насосного обладнання та контролю його стану протягом усього часу експлуатації в свердловині. Слід зазначити, що сучасні технічні засоби контролю дозволяють виявити втомні руйнування. Напруження згину є причиною передчасного руйнування штанг, що виникають при розтягу викривлених штангових колон та штанг у свердловині, а також при роботі насосних штанг у викривлених стовбурах свердловини [24; 17; 78].

Якщо штанга не має викривлень, тоді навантаження, що діють на неї, не перевищують границю її втомної міцності і така насосна штанга може працювати дуже довго і може зруйнуватися через вплив інших факторів, наприклад, корозію.

Основні недоліки штангової насосної установки обумовлені перетворюючими та передавальними ланками (наземним обладнанням і колоною насосних штанг):

- втрата довжини ходу плунжера насоса через деформацію колони насосних штанг при ході вгору і вниз;
- корозійно-втомне руйнування насосних штанг, особливо в похило-спрямованих свердловинах;
- механічне спрацювання робочої поверхні насосних штанг і НКТ;
- обмежені регулювальні властивості установки.

Такі недоліки призводять до зниження ефективності та надійності експлуатації нафтових свердловин за допомогою штангових установок. В

багатьох роботах був проведений аналіз причин руйнування насосних штанг та технічних рішень, які забезпечують підвищення їх надійності, а також проведений аналіз способів експлуатації ШСНУ [24].

Дослідження механічних характеристик насосних штанг показало, що поверхневий шар з малим вмістом вуглецю є причиною передчасного їх руйнування. Таке порушення властивостей насосних штанг призводить до зниження втомної міцності, утворення виразок, раковин. Через нерівномірність корозійних процесів втомні тріщини закономірно виникають в області вогнища корозійного ураження, що призводить до зниження довговічності насосних штанг.

Для того щоб встановити причини передчасного руйнування насосних штанг ШН19, ШН22 вітчизняних виробників досліджували хімічний склад матеріалу та проводили механічні випробування, із статистичною обробкою промислового матеріалу. Також проводилися металографічні дослідження зразків насосних штанг зі збереженою поверхнею втомного руйнування. Структура матеріалу штанг зі сталі 20Н2М, 38ХМ, 15Х2НМФ вивчалася на ділянці втомного руйнування, а також вздовж тіла насосної штанги із застосуванням методів руйнівного контролю. При проведенні металографічних досліджень зразків на поверхні штанги поряд із шаром з малим вмістом вуглецю було встановлено мікроструктуру серцевини насосних штанг зі сталі 20Н2М ферито - перлітного типу. Іншою особливістю внутрішньої будови насосних штанг, які пройшли нормалізацію (Сталь 20Н2М) була неоднорідність структури перерізу. На глибині до декількох міліметрів від поверхні структура мала неорієнтований, а в центрі - орієнтований характер (вздовж осі штанг). Це пов'язано з неоднорідними деформаціями, а також з динамічною рекристалізацією при виготовленні прокату. Нагрівання після деформації насосної штанги в процесі нормалізації також мігло вплинути на утворення неоднорідності структури металу.

Довговічність кожної конкретної насосної штанги залежить від експлуатаційних чинників (геометрія стовбура свердловини, режими відбору, фізико-хімічний склад рідини, наявність асфальтосмолистих

відкладень, використання високов'язких нафтових емульсій (ВНЕ), неорганічних солей, присутність механічних домішок в рідині). Відхилення технічних характеристик у зазначених межах не будуть вирішальними в процесі втомного руйнування штанг. [8 ; 78; 81]

Для зменшення величини шару з малим вмістом вуглецю та підвищення втомної міцності, розроблений, досліджений і реалізований спосіб виготовлення насосних штанг, що полягає у виготовленні гарячODEформованої заготовки з низькотемпературною термічною обробкою. Причому така термічна обробка (відпал 1-го роду) забезпечує в насосних штангах дрібнозернисту однорідну структуру. Це дає можливість збільшити величину границі витривалості на 20-30% в порівнянні з границею витривалості насосних штанг після проведеної нормалізації.

Розроблений, досліджений і реалізований спосіб відновлення насосної штанги в разі її обриву в процесі експлуатації, що полягає в хіміко-термічному зміцненні кінцевих ділянок насосної штанги. Внаслідок чого галтели і прилеглі до них частини тіла насосної штанги, мають границю витривалості, яка є більшою границі витривалості в 1,2 рази середньої частини тіла штанги, які пройшли додаткове зміцнення нагріванням СВЧ, і в 2,4 рази для насосних штанг, що пройшли тільки нормалізацію в середній її частині. Це дозволяє збільшити міжремонтний період штанги в 2,510 разів. Дані показники досягнуті, завдяки тому, що в поверхневому шарі кінцевих ділянок насосної штанги присутні напруження стиску [1-3; 6; 13; 24 ; 25].

В переважній більшості втомне руйнування штанг відбувається по тілу насосної штанги, яка пройшла термічну обробку, тому забезпечується можливість відновлення зруйнованої під час експлуатації насосної штанги. Зруйновані по довжині частини насосної штанги можна піддати механічній обробці, а низький вміст вуглецю в даній частині штанги забезпечує їх добру зварюваність. Використання такої технології ремонту збільшує міжремонтний період насосних штанг.

Для здійснення ремонту насосних штанг використовується штангові комплекси КШ01 та КШ02 (рис.1.5), які забезпечують комп'ютеризований

технологічний процес, що полягає у відновленні, зміцненні і встановленні характеристик міцності, а також проводить магнітоіндукційний контроль насосних штанг.



**Рисунок 1.5 - Комп'ютеризований комплекс КШ-02
(ЗАО «ИНОКАР»)**

За допомогою таких комплексів забезпечується сортування насосних штанг за марками сталі, довжиною, групою міцності, умовним діаметром, заводом-виробником і здійснювати їх паспортизацію; встановлювати їх механічні характеристики з урахуванням групи міцності штанги, забезпечувати можливість відбракування насосних штанг з врахуванням діючих навантажень; проводити бракування насосних штанг з дефектами, що порушують суцільність тіла штанги за структурною неоднорідністю; створювати базу даних за експлуатаційним фондом насосних штанг, встановлювати експлуатаційні та технічні показники насосних штанг та оптимізувати конструкцію колон насосних штанг, забезпечуючи її вимоги надійності і маси; забезпечувати зміцнення поверхні штанги і підвищувати її втомні характеристики в процесі ремонту; дотримуватися режимів, які враховують механічні властивості матеріалу насосних штанг; проводити балансування насосних штанг; проводити правку тіла насосної штанги та її дефектоскопію та багато іншого [1; 2; 6; 7; 13; 24] .

Для виявлення дефектів, що порушують суцільність і однорідність структури матеріалу насосних штанг використовують різні методи

неруйнівного контролю. Магнітолюмінесцентний метод неруйнівного контролю насосних штанг використовується для раннього виявлення втомних мікротріщин і видимого контролю стану поверхні на наявність мікротріщин. Є два методи здійснення магнітолюмінесцентного методу: сухий і мокрий. Такий контроль здійснюється із застосуванням магнітолюмінесцентних сухих порошоків ЛЮМАГПОР-5 (ТУ6-09-5296-86) та LY-2500 фірми "Helling" а також суспензій на їх основі. Таким чином, магнітолюмінесцентний метод контролю дозволяє ефективно діагностувати поверхневі дефекти насосної штанги на наявність мікро-макротріщин [36; 38].

Метод вимірювання шумів Баркгаузена володіє високою чутливістю до структурних змін феромагнітного матеріалу. Тому цей метод доцільно використовувати для прогнозування експлуатаційних можливостей насосних штанг, які були в експлуатації.

Для визначення перегріву при шліфуванні, зміни в мікроструктурі металу, зміни напружень в поверхневому шарі штанги, якості термообробки доцільно використовувати діагностику шумами Баркгаузена. Аналіз таких шумів є одним з методів визначення (контролю) залишкових напружень. Визначати залишкові напруження можна або якісно, або кількісно. Тобто шляхом порівняння з еталоном, або після проведення відповідного калібрування і при врахуванні впливу на результат інших факторів, наприклад, твердості після гартування. Із меншенням амплітуди шумів Баркгаузена відбувається руйнування кристалічної решітки матеріалу насосної штанги, зародженням та розвитком мікротріщин і макронещільностей зовнішньої поверхні штанги [2; 4; 7; 25].

Наявність мікронещільностей і їх величину в поверхневому шарі та процес руйнування кристалічної решітки матеріалу насосної штанги можна визначити такими методами неруйнівного контролю, як магнітолюмінесцентним, люмінесцентним, вихрострумовим, магніто-індукційним. За допомогою використання вихроструменевого та магнітолюмінесцентного методу контролю можна виявити тріщини на поверхні штанги, встановити характер зміни технічних характеристик насосної штанги в процесі їх ремонту.

За допомогою магнітоіндукційного контролю в постійному магнітному

полі рухомої системи можна здійснити автоматизоване дослідження насосних штанг на довжині від 6200 мм і більше без очищення поверхні від забруднень. Також такий контроль використовується для виявлення дефектів неоднорідності і нещільності структури матеріалу. Наявність різного роду дефекту в тілі насосної штанги впливає на перерозподіл магнітного потоку, що проходить через нього в поздовжньому напрямку. Зміна величини силової лінії визначає геометричні розміри дефекту, величину його розкриття, площу поперечного перерізу та його протяжність. Магнітоіндукційні методи охоплюють смугу частот від декількох Гц до 1000 Гц та використовуються для того щоб визначити загальні та технологічні властивості матеріалу, тип та структуру зерна, твердість та глибину зміцненого шару. За допомогою магнітоіндукційного методу можна вибірково досліджувати різні ділянки штанги, змінюючи частоту.

В результаті проведення дефектоскопії виникає різке збільшення амплітуди через видиме розкриття тріщини за наявності дефекту. Це відбувається внаслідок пружного або пластичного непропорційного видовження штанги від прикладеного навантаження.

Таким чином, магнітоіндукційний метод неруйнівного контролю насосних штанг дозволяє вибирати такі штанги в нафтовій свердловині, які придатні для подальшої експлуатації, незалежно від забруднення їх зовнішньої поверхні [24 ; 25].

Номінальні напруження в найбільш навантажених насосних штангах колони при звичайних режимах відкачування рідини з свердловини набагато менші границі витривалості металу. У штангах, які виготовляються на даний час із сталей наступних марок: 40У, 36Г1, 15НМ, 15Н4М, 20ХН, 20Н2М, 20ХН2М, 30ХМ, 30ХМА, 15Н3МА, 15Х2НМФ, 15Х2ГМФ, 14Х3ГМЮ, 38ХМ, 35Г2, 40Г2, 40ХГМ, 20ХГН2М, АЦ28ХГН3ФТ границя витривалості на повітрі знаходиться в межах від 294 МПа до 490 МПа, а номінальні напруження у верхньому перерізі насосних штанг в деяких випадках перевищують значення, що знаходяться в діапазоні 117,6 - 166,6 МПа. Тим не менше, відбувається

руйнування насосних штанг при зазначених напруженнях в діапазоні 117,6 - 166,6 МПа через такі причини:

а) технічні (дефекти, що знаходяться на поверхні або дефекти в структурі металу штанги, які виникають через недотримання технології її виготовлення, внаслідок термічної обробки; відхилення глибини зміцненого шару від значення зазначеного в технічних вимогах; наявність механічних пошкоджень на поверхні насосних штанг; поздовжній вигин тіла штанг більше допустимого; зменшення перерізу тіла насосної штанги внаслідок її спрацювання у викривлених або похилоспрямованих свердловинах; надмірна пластична деформація тіла насосної штанги; виникнення напружень в поверхневому шарі металу через вигин насосної штанги в процесі транспортування або в процесі спускопідйомних операцій; тривалий циклічний вплив навантаження розтягу або стиску від статичних (ваги колони насосних штанг і рідини) та динамічних (інерційних, вібраційних) навантажень; агресивне середовище в свердловині.

б) організаційні (порушений технологічний процес експлуатації глибинонасосного обладнання та режимів відкачування сировини; устаткування доукомплектовано вузлами і механізмами без покращення його динамічних і кінематичних характеристик; використання некорозійностійкого обладнання за наявності в рідині корозійно активних речовин [24 ; 25; 52; 68].

Виявлено, що практично всі руйнування насосних штанг виникають через корозійну втому металу. Такі руйнування відбуваються під дією постійних зусиль розтягу і стиску та від статичних навантажень (ваги насосної штанги) в рідині, інерційної сили рухомих мас рідини і колони насосних штанг, навантажень, що виникають через вібрацію колони насосних штанг, невідповідності швидкості руху плунжера насоса до полірованого штока. В окремих перетинах насосних штанг спостерігається пошкодження втоми через анизотропність металу. В цьому випадку спостерігаються місцеві напруження, що є більшими від границі пропорційності і мають тимчасовий опір. Це веде за собою утворення місцевих пластичних деформацій, внутрішніх мікротріщин в штанзі, які, стають вогнищами концентрації напружень, та які ростуть, поки не відбудеться раптове руйнування у перерізі штанги.

Колона насосних штанг (КНШ) є найслабшою ланкою штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ). Саме насосні штанги різко обмежують надійність і довговічність штангової колони. Це пов'язано із надзвичайно складними умовами експлуатації насосних штанг. Сучасна нафтовидобувна галузь вимагає збільшення середніх глибин діючих свердловин. Такі умови експлуатації ускладнюють роботу колони насосних штанг. Це пов'язано з появою напружень згину в тілі насосних штанг та їх зношуванням внаслідок тертя по внутрішній поверхні насосно-компресорних труб в свердловині на викривлених ділянках. Тому проблема забезпечення надійності та довговічності колони насосних штанг є надзвичайно актуальною. Важливим практичним завданням для вирішення цієї проблеми є розробка нових технологій відновлення насосних штанг після їх експлуатації[25, 30, 41, 43, 52,78].

1.5 Сучасні методи підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними дефектами

Технологічний процес виготовлення насосної штанги складається із шести ковальсько-пресових операцій, що виконують на горизонтально-ковальському пресі. Спочатку формують тіло штанги, потім різьбові кінці, перехідні ділянки, квадратів (лисок). Технологічний процес виготовлення штампованих штанг закінчується нормалізацією або гартуванням і відпуском.

В процесі експлуатації насосні штанги піддаються складному напружено-деформаційному навантаженню (розтягування, вигинання та стиску). На штанги дія силового навантаження посилюється корозійним впливом агресивних середовищ в свердловині, та кінць кінцем призводить до утворення різного роду дефектів, в тому числі потертостей тіла насосних штанг в результаті їх зіткнення в процесі зворотно-поступального руху з насосно-компресорними трубами, виразки корозійного походження, забоїни і т.п. В процесі ремонту свердловини тангові колони демонтують, проводять контроль

їх стану та частину насосних штанг, колишніх у тривалій експлуатації, направляється в ремонт.

Згідно технічних умов ТУ 3665-032-00217515-04 «Штанги насосні відновлені» допускається на поверхні відремонтованих штанг поверхневі дефекти глибиною не більше 2,0 мм та загальне зменшення поперечного перерізу насосних штанг до 20%. Такого роду дефекти знижують несучу здатність штанг, тому їх застосування є вкрай небезпечним для подальшої експлуатації в свердловині [24 ; 25].

Існує декілька способів відновлення працездатності насосних штанг. Один із таких способів ремонту передбачає такі операції: очищення ШН від асфальтосмолопарафінистих (АСП) відкладень, радіаційний контроль, візуальний і приладовий (на основі фізичних неруйнівних методів) контроль якості насосних штанг. На основі результатів контролю насосні штанги разбраковуються і ті з них, які мають дефекти не більше допустимих, спрямовуються для здійснення відновлювального ремонту, в процесі здійснення якого проводиться: обрізування головок, дробоструйна обробка поверхні насосних штанг, механічна обробка, включаючи нарізування різьби на їх головках [8].

Відомий спосіб ремонту передбачає термічну обробку металу штанг. Проводиться нормалізація (нагрівання до температури 920-950°C і охолодження на повітрі), або високий відпуск (нагрівання до температури 600-650°C з витримкою в печі не менше 2 годин з охолодженням на повітрі). За рахунок термічної обробки покращуються механічні характеристики, зменшуються міцнісні властивості металу (σ_T і σ_B) і збільшується пластично - відносне подовження і ударна в'язкість. У результаті ремонту зменшується крихкість металу насосних штанг, що покращує певною мірою їх технічні характеристики. Однак цей спосіб ремонту не передбачає виправлення поверхневих дефектів, їх кількість, розміри та форма повністю зберігаються.

Більш повне відновлення технічних характеристик насосних штанг і збільшення обсягів їх ремонту після тривалої експлуатації можливо здійснити пластичною деформацією, що здійснюється в режимі високої термомеханічної

обробки (ВТМО). В цьому випадку очищена від асфальтосмолопарафінистих відкладень, що пройшли радіаційний, приладовий і візуальний контроль, після обрізування головок насосні штанги надходять в нагрівальну піч і нагріваються до температури 800-850°C (температура нагріву залежить від марки сталі). Поверхня нагрітих заготовок піддається пластичній деформації, шари металу зміщуються, а початковий діаметр насосних штанг зменшується. В результаті деформації металу всі дефекти поверхні заготовки насосної штанги заковчуються, тобто заліковуються, поверхня насосної штанги після пластичної деформації отримує високу чистоту, виразки та нерівності на поверхні повністю усуваються, овальність тіла штанг, що утворюється в результаті стирання об поверхню насосно-копресорних труб виправляється, переріз штанги набуває форму ідеального кола. Після прокатки заготовки насосних штанг піддаються інтенсивному охолодженню до температури 250-300°C, у результаті метал набуває дрібнозернисту, рівноважну структуру і високі фізико-механічні властивості. Міцнісні характеристики (σ_T і σ_B) і пластичні властивості металу збільшуються. Після здійснення технологічних операцій пластичної деформації в режимі ВТМО здійснюються відомі технологічні операції виготовлення насосних штанг [25].

Фірма «Deuytroit Tap and Tool» запропонувала нове з'єднання з різьбою «Спіральок». В запропонованих різьбових з'єднаннях лише 18 % навантажень сприймають перші робочі витки різьби, а в стандартних насосних штангах 60 %. Решта навантаження рівномірно розподіляється по всьому різьбовому з'єднанню штанги. Традиційною технологією виготовлення штангових муфт є метод механічної обробки на токарно-свердлильних верстатах. Запропоноване фірмою застосування холодної екструзії для виготовлення штангових муфт зменшило витрати металу на 35 % та майже вдвоє підвищило довговічність муфтових з'єднань.

Також існує технологія виготовлення сталевих штанг методом інерційного зварювання. Це окремо виготовлені різьбові ніпелі з'єднуються із тілом штанги. Суть технології полягає у з'єднанні ніпеля методом притискання його до тіла насосної штанги з одночасним обертанням, що забезпечує надійну фіксацію

тіла штанги у спеціальному пристрої. Розроблено різьбове з'єднання, в якому штангова муфта на кінці має внутрішню гладку конічну розточку, що дає можливість захисту від корозійно-активного середовища та підвищує опір колони штанг дії змінних навантажень згину. В процесі згвинчування з'єднання конічна поверхня муфти деформується, що забезпечує щільне прилягання до гладкої поверхні штанги поза різьбою. Обтискується спеціальним інструментом забезпечується гарантований контакт торця муфти. Така конструкція захищає з'єднання від корозійного середовища та підвищує циклічну міцність.

Конструкція замкових насосних штанг розроблена із ніпельною і муфтовою частинами, що накручуються на штанги способом гарячої посадки. Така конструкція дає можливість їх ремонту у випадку спрацювання різьби вище допустимих норм або їх пошкодження.

Фірма «Mega Industries» запропонувала виготовлення насосних штанг із алюмінієвих сплавів із сталевими муфтовими з'єднаннями, які забезпечені захистом від корозійного руйнування. Вартість алюмінієвих насосних штанг є вищою, але у них на 30 % менша вага в порівнянні із сталевими, також вони в 3-5 рази стійкіші до впливу корозійного середовища в свердловині та можуть використовуватися при експлуатації глибоких свердловин [34, 35, 39, 41, 43].

1.6 Висновки до розділу 1

Огляд науково-технічної літератури показав, що забезпечення надійності елементів конструкцій та деталей машин - складне й актуальне завдання, яке стосується оцінювання довговічності та залишкового ресурсу. Вирішити це завдання можна комплексно на окремих етапах: від стадії проектування до стадії експлуатації, тобто де закладається надійність і де надійність має реалізуватися [25; 24; 34, 35].

Слід враховувати механізми руйнування матеріалів, які можуть проявитися під час експлуатації, передусім - втомні процеси. Статистичні дані засвідчують, що безпосереднім наслідком втомних процесів є більше 90% усіх руйнувань інженерних конструкцій. Тому проблема прогнозування довговічності насосних

штанг та їх залишкового ресурсу в умовах корозійної втоми надзвичайно актуальна, тому що може призвести до аварій із значними матеріальними затратами [2; 3; 34; 35; 39; 41; 43; 76; 77].

Колона насосних штанг (КНШ) є однією із найслабших елементів штангової свердловинної насосної установки (ШСНУ). Саме насосні штанги різко обмежують надійність і довговічність штангової свердловинної установки в цілому. Це пов'язано із надзвичайно складними умовами роботи насосних штанг. Змінні навантаження розтягу та згину, тертя об колону насосно-компресорних труб, відкладення асфальто-смоляно-парафінових речовин, вплив корозійно середовища та інші експлуатаційні фактори призводять до появи та інтенсивного розвитку корозійно-втомних тріщин і, як наслідок, до руйнування колони штанг. Такі аварії пов'язані з великими матеріальними затратами на ремонт. Традиційні та інноваційні способи підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями збільшують їх ресурс, але проблема прогнозування їх довговічності вирішена частково [1; 2; 7; 13; 24; 76 - 85]. На основі викладеного сформульовано мету і основні задачі дослідження.

Матеріали, наведені у даному розділі, відображено у таких публікаціях:

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 Копей Б.В., Копей В.Б., Мартинець О.Р., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової насосної установки. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 2 (47). С.62-71.

3 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Склад і властивості асфальтосмолистих речовин. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 2 (51). С.45-50.

4 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Овецький С. О., Стефанишин А.Б. Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании*

2013: Материали міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 18-29 червня 2013). Одеса: Куприєнко, 2013. Випуск 2, том 7. С.78-84. (Index Copernicus)

5 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі: Тези доповідей науково-технічної конференції* (Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. С.118-220.

6 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Аналіз методів відновлення відбракованих насосних штанг. *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів* (Івано-Франківськ, 5-7 листопада 2012). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2018. С.130 – 132.

7 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І., Онищук О.О. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційний потенціал української науки – ХХІ сторіччя: Матеріали доповідей учасників сімнадцятої Всеукраїнської науково-практичної конференції* (Запоріжжя, 22-26 жовтня 2012). Запоріжжя: Видавництво ПГА, 2012. С. 124-134.

8 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Аналіз способів ремонту насосних штанг. *Нафтогазова енергетика – 2013: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції* (Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2013. С. 134-136.

9 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Порівняльний аналіз поломок насосних штанг в різних регіонах. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ* (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 117-118.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАСОСНИХ ШТАНГ

У процесі експлуатації в насосних штангах з'являються різні дефекти (раковини, тріщини, пори, потертості, розшарування і т.п.), що призводить до зміни технічних характеристик, погіршенню надійності та зниженню ресурсу виробу. Тому останнім часом в рішенні завдань підвищення надійності виробів отримала розвиток методика, заснована на вивченні фізичних процесів, які відбуваються в матеріалі конструкції і є причиною появи пошкоджень. Відомі методи неруйнівного контролю стану матеріалів, такі як рентгенівська радіографія і ультразвукова дефектоскопія забезпечують деякий вибірковий контроль в окремих зонах матеріалу виробу, виявляючи значні дефекти. Такі методи не дають інформації про те, наскільки виявлений дефект може бути небезпечним. В залежності від місця розташування дефект може бути небезпечним або безпечним. Метод акустичної емісії (АЕ) на відміну від вищезгаданих методів, заснований на випромінюванні матеріалом при його деформації пружних механічних хвиль, джерелом яких є тріщини, що розвиваються, володіє достатньо високою чутливістю та, можливістю виявляти і стежити за поведінкою дефектів та дозволяє контролювати стан матеріалу без сканування. Цей метод є простотим у використанні в процесі випробувань, виробництва й експлуатації також дає можливість контролювати різні матеріали, як однорідні, так і неоднорідні, у тому числі і композити [36-38].

Особливе місце в механіці втомного руйнування займає ріст коротких тріщин. Більшість досліджень росту втомних тріщин проводиться з використанням методик, які передбачають випробування зразків з довгими тріщинами. Проте в реальних конструкціях, в тому числі в насосних штангах, неминучим є ріст дефектів малого розміру, які мають технологічне або експлуатаційне походження [32; 67].

Поведінка коротких і довгих тріщин істотно відмінна, особливо при їх поширенні в припороговій області – короткі тріщини ростуть значно швидше за довгі при однакових номінальних значеннях розмаху коефіцієнта інтенсивності

напружень (КІН). Оскільки стадія поширення короткої втомної тріщини проходить безпосередньо за стадією її зародження, розділити ці стадії складно. Тому існують різні підходи для визначення поняття короткої тріщини з позиції механіки втомного руйнування [32; 66; 67].

2.1 Конструкції зразків насосних штанг

В процесі видобутку нафти штанговими свердловинними насосними установками застосовують велику кількість типів та конструкцій насосних штанг [24; 25]. Класичні металеві штанги виготовляються з суцільного стержня з висадженими на кінцях головками. Останніми роками знаходять використання склопластикові, вуглепластикові та гібридні насосні штанги. Гібридні штанги мають вуглеволокнисте осердя та оболонку з скловолокна [18].

Для отримання втомних і корозійно-втомних характеристик сталей насосних штанг досліджували лабораторні зразки з діаметром робочої частини 5 - 10 мм (ГОСТ-2860-65). Конструкції зразків показані на рис. 2.1.

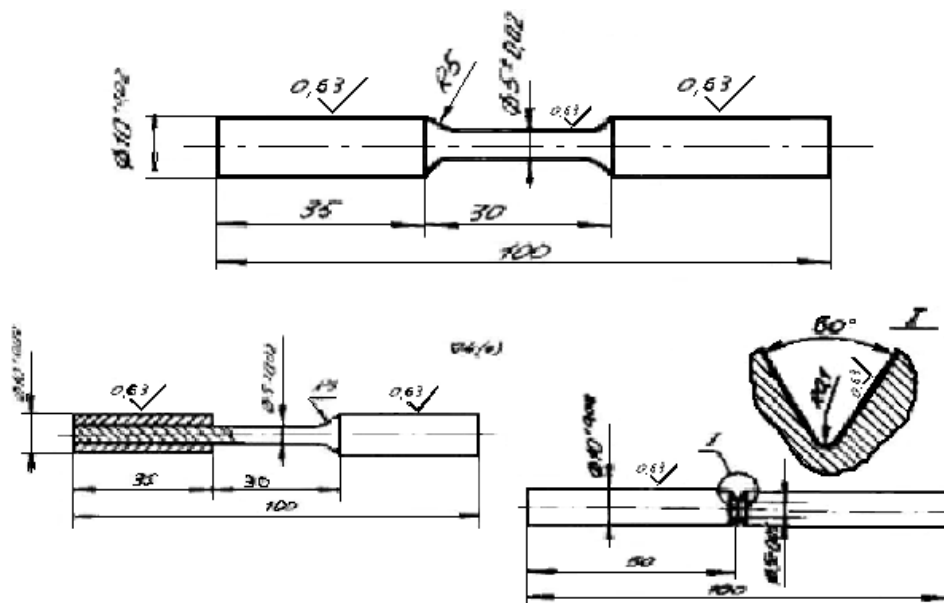


Рисунок 2.1 - Конструкції зразків для втомних і корозійно-втомних випробувань сталей насосних штанг

З метою збереження мікроструктури сталі з врахуванням механічних дефектів типу неметалічних включень і для забезпечення ідентичності текстури металу, яка утворюється при прокаті прутків, лабораторні зразки вирізали з стандартного круглого прокату. При цьому фрезерування заготовок у вигляді повздовжніх брусків розмірами 12x12x100 мм проводили при значному охолодженні, застосовуючи мастильно-охолоджуючу рідину (МОР) у вигляді масляної емульсії. Потім проводилася токарна обробка і шліфування. Фінішна токарна обробка проводилася при глибині різання 0,1...0,2 мм і подачі 0,05 мм/об. Шліфування проводили в центрах при значному охолодженні МОР, застосовуючи більш м'які круги з відкритою структурою. Чистота поверхні зразків після шліфування відповідала класу 0,63 (ГОСТ 2.309-73). Режим механічної обробки вибирали таким, щоб наклеп поверхні робочої частини зразків був мінімальним.

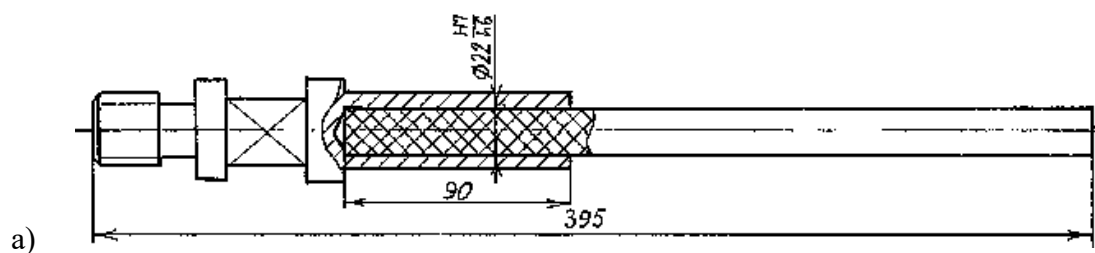
Гладкі зразки діаметром 5 мм (рис.2.1,а) випробовували з метою отримання базових корозійно-втомних характеристик сталей в лабораторному розчині. На цих зразках проводилася оцінка зміни циклічної міцності сталі при підвищених температурах і різної мінералізації середовища, при введенні в розчин антикорозійних добавок і його емульгуванні.

Зразки діаметром 5 мм (рис. 2.1,б) з концентраторами напружень (радіус дна надрізу $R = 0,1$ мм) використовували для оцінки чутливості сталей до надрізів і для визначення ефективності зміцнення сталей методом поверхневої пластичної деформації чи термодифузійного насичення.

У різьбових з'єднаннях штангової колони при експлуатації в свердловині виникають процеси фретінг- і щілинної корозії. Визначення впливу цих процесів на корозійно-втомну міцність сталі проводили на лабораторних зразках діаметром 5 мм з насадками (рис. 2.1,в). Пресову посадку втулок на зразки проводили по 2-му класу точності (ОСТ 1043) з натягом 0,01 мм шляхом селективної зборки.

Методика натурних випробувань на втому була використана для визначення працездатності склопластикових насосних штанг в умовах дії навантажень згину. Для такого випробування був використаний спеціальний

зразок довжиною 395 мм (рис. 2.2), який складається з головки (рис. 2.3) та тіла склопластикової насосної штанги. Зразки навантажували у корозійному середовищі циклічним консольним згином та визначали характеристику втоми на основі кривої втоми (залежність числа циклів навантаження до руйнування в залежності від амплітуди циклічних напружень). Проводились розрахунки характеристики розсіювання витривалості насосних штанг [25]. Такі дані можна використовувати для порівняння міцності полімерних штанг у різних агресивних середовищах, а також зі сталевими штангами [24].



а)



б)

а) ескіз зразка для випробування на втомну міцність склопластикових насосних штанг; б) зразок для випробування на втомну міцність гібридних насосних штанг.

Рисунок 2.2 - Зразки для випробування на втомну міцність склопластикових та гібридних насосних штанг

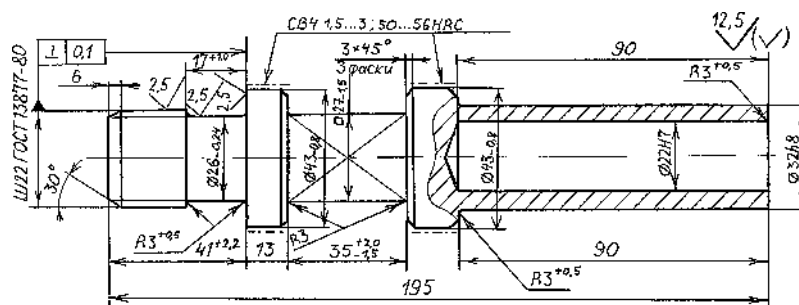


Рисунок 2.3 - Конструкція головки склопластикової та гібридної штанги $\Phi 22$ мм

З'єднання головки склопластикової штанги з тілом здійснювали на пресі з точністю вимірювання переміщення штампа 0,1 мм.

При проведенні досліджень сталених штанг використовували взірець та схему наведену на рис. 2.4. Для випробувань насосних штанг використовували 3%-ний розчин NaCl, пластову воду, нафтові емульсії.

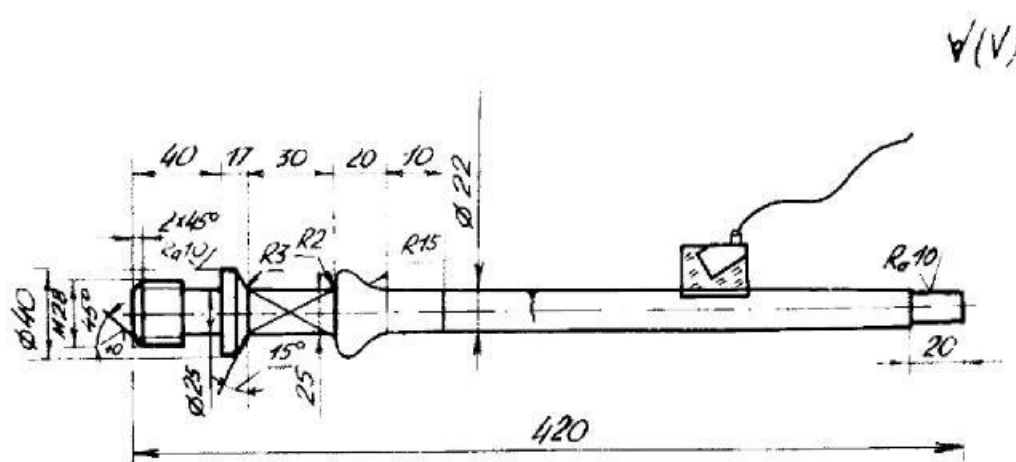


Рисунок 2.4 – Конструкція зразка та схема ультразвукового контролю дефекту в штанзі

2.2 Методика контролю росту тріщин втоми в зразках насосних штанг

Дослідження механізмів руйнування у значній мірі спираються на електронну мікроскопію та пов'язане з поясненням та описом процесів руйнування за допомогою електронних мікроскопів. Не можна сказати, щоб ця методика є широко відома, тому доречно дати її короткий опис.

Електрони можуть проходити через шар матеріалу товщиною в декілька сотень або тисяч ангстрем. Тому в прохідному пучку за допомогою електронної мікроскопії досліджувати пошкоджену поверхню не можна, а її форму потрібно перенести на прозору, тонку для електронів репліку. Технологія копіювання (рис. 2.5) включає проміжний етап виготовлення репліки з пластмаси та найбільш широко використовується. Пластмасу в рідкому стані наносять на зруйновану поверхню (рис. 2.5, а).

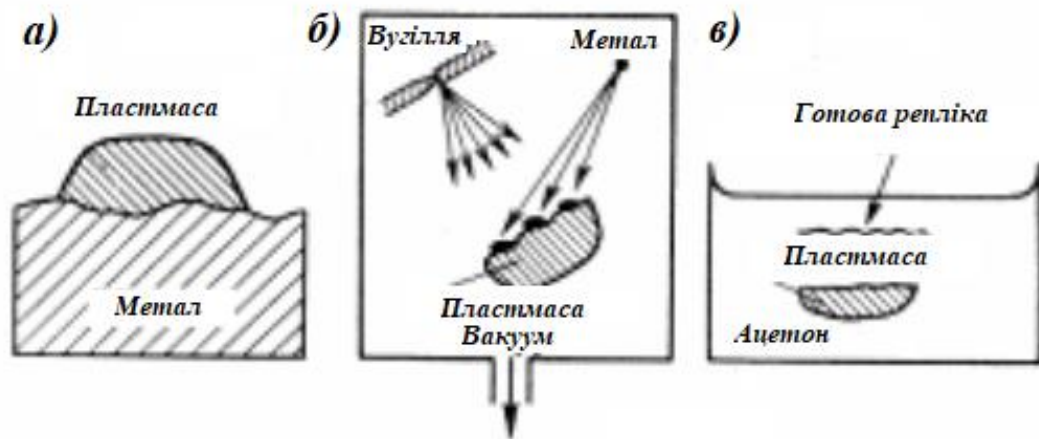


Рисунок 2.5 - Двоетапне виготовлення реплік для електронної фрактографії

Досліджувану поверхню потрібно повністю очистити від вологи, щоб пластмаса могла повністю заповнити найменші виїмки. Після того як пластмаса стала твердою її відділяють від поверхні, встановлюють у вакуумну камеру і за допомогою двох вугільних електродів методом випаровування наносять тонкий шар вугілля (рис. 2.5, б). Випаровування збільшує контраст і відтіняє картину. Після цього пластмасу поміщають в ацетон до повного розчинення (рис. 2.5, в), а вугільна репліка наноситься на мідну сітку, для подальшого дослідження в мікроскопі.

Вугільна репліка через наявність безлічі дрібних нерівностей має відповідну міцність і жорсткість. За допомогою стереографічних вимірювань ця технологія дозволяє визначити топографію поверхні руйнування матеріалу.

Засоби електронної мікроскопії структури металів допомагають у вивченні механізмів руйнування. В цьому випадку для електронного пучка метал потрібно зробити прозорим. Це досягається виготовленням з металу технологічних засобів електрополіровки дуже тонкої фольги (завтовшки 500–1500). При проходженні електронного пучка через такий метал в місцях великої густини енергія пучка буде зменшуватися, тому маленькі частинки всередині фольги будуть зображені як темні області. Електронний пучок буде відхилятися в місцях, де кристалічні ґратки порушені, тобто на межах дислокацій і зерна металу.

Можливість досліджувати поверхню руйнування безпосередньо, без реплік з'явилася з появою електронного мікроскопа з скануючим променем. Електронний промінь досить високої інтенсивності сканує поверхню руйнування. Збудження первинними електронами приводить до виходу з поверхні руйнування інших електронів (вторинних). Ці вторинні електрони відображають поверхню розриву, яка робиться видимою за допомогою катодно-променевої електронної трубки. Сканування в трубці проводиться так само, як і сканування електронного променя.

Звичайно, що кожен з мікроскопів має свої недоліки. Одним з основних переваг скануючого мікроскопа є те, що не потрібно робити репліки, так як виникає сумнів щодо їх достовірності. Зображення, які отримані за допомогою скануючого мікроскопа, мають велику точність, тоді як дані, отримані за допомогою мікроскопа в прохідному пучку, більш детальні [67; 74; 76].

2.3 Особливості оцінювання циклічної тріщиностійкості конструкційних матеріалів

Підходи лінійної механіки руйнування широко використовують для оцінювання опору росту втомних тріщин. Основною характеристикою є кінетична діаграма втомного руйнування (КДВР) в координатах “швидкість росту тріщини da/dN - розмах КІН (коефіцієнт інтенсивності напружень) ДК” (рис. 2.6). Параметр ДК краще характеризує напружено-деформований стан у вершині тріщини, ніж $K_{\text{тах}}$, оскільки відбиває реверсивну пластичну деформацію матеріалу в околі вершини тріщини, що є основою його втомної пошкоджуваності.

da/dt , м/цикл

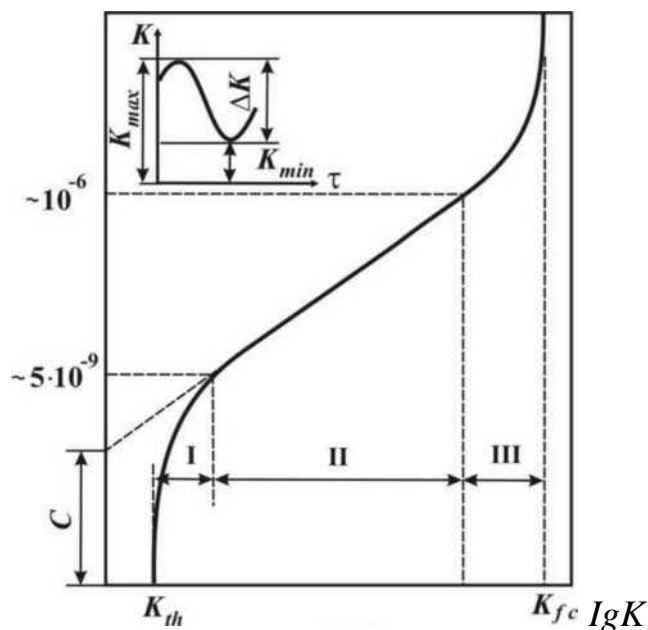


Рисунок 2.6 - Кінетична діаграма втомного росту тріщини (схема))

КДВР охоплює весь можливий діапазон росту втомної тріщини від порогових значень K_{th} до K_{fc} , які відповідають умові нерозповсюдження тріщини, до гранично високих значень K_{fc} (циклічна в'язкість руйнування), за якими відбувається неконтрольований (спонтанний) ріст тріщини.

КДВР прийнято ділити на три характерні ділянки (рис. 2.5): I - припорогова; II - середня і III, яка відповідає значному прискоренню росту тріщини. Найбільш поширена у використанні середня ділянка КДВР, яка у подвійних логарифмічних координатах подається лінійною залежністю відповідно до відомого рівняння Паріса

$$da/dN = C(AK)^m, \quad (2.4)$$

де C і m - константи.

Менше уваги надається припороговій ділянці КДВР і визначенню порігу циклічної тріщиностійкості K_{th} через певні методичні труднощі і велику тривалість експериментальних випробувань. Методичні рекомендації вважають достатнім приймати за порогові такі значення K_{th} , які відповідають $da/dN = 10^{-10}$ м/цикл. Проте приймати такі значення як умову повного нерозповсюдження тріщини не варто, оскільки перехід до гігациклової втоми, тобто подовження

тривалості випробувань, вказують на подальше зниження порогу тріщиностійкості.

Важлива особливість КДВР у її інваріантності стосовно низки умов випробувань, що має важливе значення при використанні таких діаграм для прогнозування довговічності виробів на стадії втомного росту тріщини. До таких умов належать, в першу чергу, коефіцієнт асиметрії циклу навантаження A і температура випробування. Частота і форма циклу навантаження у певному інтервалі частот можуть не впливати на циклічну тріщиностійкість металів на повітрі. Загалом вважають, що за певної товщини зразків, яка забезпечує ріст тріщини в умовах плоскої деформації, інваріантність КДВР стосовно геометрії зразків зберігається. Разом з тим відомі відхилення від цього правила, причому для припорогового росту тріщини, через закриття тріщин (ЗТ), для якого, умови плоскої деформації не є гарантією інваріантності, тобто інтенсивність ЗТ може бути різною навіть за дотримання умов плоскої деформації.

Закриття тріщин є важливим феноменом механіки втомного руйнування, воно властиве в першу чергу припороговому росту тріщин. Її суть полягає у передчасному (за позитивного значення КІН) контакту берегів тріщини у півциклі розвантаження, тому за подальшого зниження навантаження механічна ситуація у вершині тріщини практично не міняється, а це означає відсутність циклічної деформації впродовж нижньої частини циклу. Звідси ця частина циклу вважається “неефективною”, тому як механічну рушійну силу втомного росту тріщини необхідно розглядати не весь розмах ДК, а ефективний:

$$DK_e = DK - DK_{Cl}, \quad (2.5)$$

де DK_{Cl} - «закрита» частина циклу навантаження.

Закриття тріщин оцінюється експериментально визначенням КІН розкриття тріщини K_{op} , для цього існує низка методик. Це дає можливість будувати ефективні КДВР з урахуванням ЗТ як чинника сповільнення швидкості росту тріщини.

Існує низка механізмів ЗТ, з яких найпоширеніші три: ЗТ, спричинене пластичністю; ЗТ, зумовлене продуктами корозії у порожнині тріщини; ЗТ,

пов'язане з шорсткістю поверхонь тріщини. За першим механізмом ЗТ зростає з підвищенням пластичності металу, за другим - при рості тріщини у вологому повітрі чи корозійному середовищі (у вакууму відсутнє), а за третім - якщо траєкторія росту тріщин складна, наприклад, міжзеренного руйнування [11; 18; 24; 75; 66; 67].

2.4 Методика вирощування і гальмування росту коротких тріщин

Особливе місце в механіці втомного руйнування займає ріст коротких тріщин. Зазначимо, що більшість досліджень росту втомних тріщин проводиться з використанням методик, які передбачають випробування зразків з довгими тріщинами. Проте в реальних конструкціях, в тому числі в насосних штангах, неминучим є ріст дефектів малого розміру, які мають технологічне або експлуатаційне походження [32; 67].

Поведінка коротких і довгих тріщин істотно відмінна, особливо при їх поширенні в припороговій області - короткі тріщини ростуть значно швидше за довгі при однакових номінальних значеннях розмаху КІН. Оскільки стадія поширення короткої втомної тріщини слідує безпосередньо за стадією її зародження, розділити ці стадії складно. Тому існують різні підходи для визначення поняття короткої тріщини. З позиції механіки втомного руйнування до коротких тріщин слід віднести дефекти, розміри яких не забезпечують інваріантності швидкості росту тріщини від розмаху КІН [24; 25; 21; 11].

Використали наступну методику отримання коротких тріщин, для яких би була застосовною механіка руйнування. На балковому зразку розміром 9 мм x 15,2 мм x 160 мм досліджуваної сталі звичайним способом вирощували втомну тріщину довжиною більше 2 мм. Не брали до уваги глибину концентратора і вважали, що ефект коротких тріщин повинен проявитися за меншої їх довжини. Після вирощування такої тріщини при рівні $AK \sim AK^*$ визначали коефіцієнт u і періодично на електроіскровому верстаті виконували вздовж тріщини проріз шириною 0,2 мм і висотою, меншою довжини тріщини a (рис. 2.7, рис. 2.8). За найглибшого прорізу на зразку залишалася тріщина довжиною $\sim 0,3$ мм,

реєстрована на бокових її поверхнях.

Оскільки ширина прорізу була меншою за довжину тріщини, тоді згідно законів механіки руйнування довжина тріщини буде рівна сумарній довжині фізичної тріщини і глибини концентратора і прорізу. Таким чином, на напружений стан в околі тріщини не повинен впливати метод нанесення на зразок прорізу, який описується параметром КІН. Навіть якщо припустити, що нанесення прорізу таки вплинуло на цей стан, то ефект може бути тільки в ослабленні напруженого стану, тобто реальний КІН у такій вершині був би меншим і, відповідно, поширення такої тріщини було би утрудненим. Крім того, зона термічного впливу становила всього 0,2 мм від поверхні прорізу. Це не допускало зміни стану металу у вершині тріщини, довжина якої була не менше 0,3 мм.

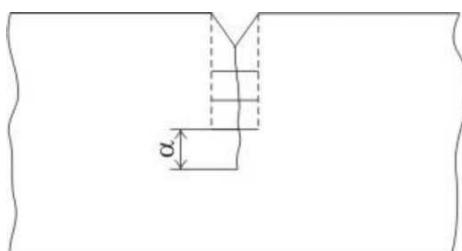


Рисунок 2.7 - Схема виконання на зразку прорізу електроіскровим

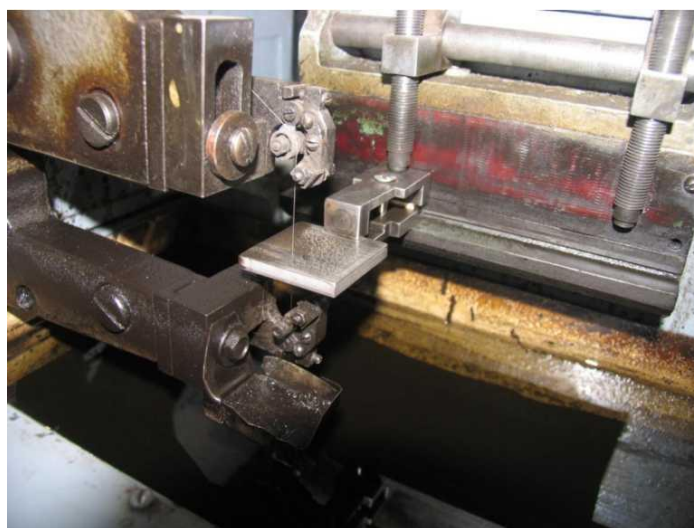
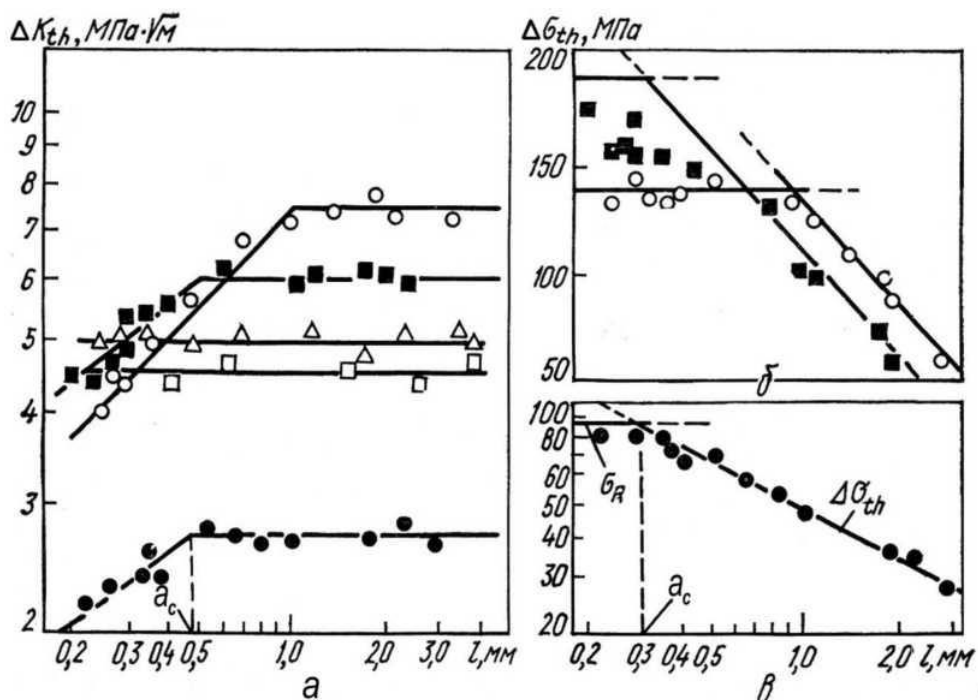


Рисунок 2.8 - Загальний вигляд електроіскрового верстату для прорізання різних довжин тріщин з метою отримати тріщини різних довжин

На рис. 2.9, а наведені залежності порогів втоми ΔK_{th} від довжини тріщини a для низки конструкційних сплавів. Можна відзначити критичну довжину тріщини a_c , більше якої досягаються інваріантні від довжини тріщини значення. Таким чином, виходячи з механічних ефектів поширення тріщини, можна віднести тріщини до розряду довгих чи коротких [5; 21; 22; 32; 67].

Стабільні значення порогу втоми отримують тільки в тому випадку, коли розмах номінального напруження $\Delta\sigma_{th}$, що виникає в зразку з тріщиною, в якій досягнуто поріг втоми, не перевищує границю витривалості матеріалу σ_R (рис. 2.9 б, в).



о - технічне залізо; ■ - сталь 20Х13 (відпал); А - аустенітна сталь зі вмістом 0,45 % вуглецю; □ - сталь 20Х13 (гартування); • - алюмінієвий сплав АМГ-61

Рисунок 2.9 - Залежності порогів втоми ΔK_{th} (а) і розмахів номінальних напружень, які відповідають порогу втоми (б, в), від довжини тріщини

Головною причиною феномену коротких втомних тріщин є так зване закриття тріщин. При розгляді механічної рушійної сили росту втомної тріщини береться до уваги вже не номінальний ΔK , а ефективний розмах коефіцієнту

інтенсивності напружень ΔK_{eff} і відносно нього треба будувати кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР), тобто залежності $da/dN - \Delta K_{eff}$, якщо шукати інваріантні КДВР. У відомих працях експериментально показано залежність ефекту закриття тріщин від довжини тріщини, тобто ефект закриття тріщини не є характеристикою матеріалу і умов циклічного навантаження і, відповідно, описування втомного росту тріщини не буде однозначним, якщо брати до уваги зміну закриття тріщини зі зміною її довжини в діапазоні коротких тріщин.

З іншого боку, тривала експлуатація насосних штанг зумовлює деградацію механічних властивостей матеріалу та характеристик опору крихкому руйнуванню. Це стосується і циклічної тріщиностійкості сталей, тобто можна очікувати негативного прояву не тільки явища коротких тріщин, але і експлуатаційної деградації металу насосних штанг [11; 32; 66; 67].

Обстеження і контроль насосних штанг дають можливість виявляти тріщини довжиною 1 мм і навіть менше. Такого роду тріщини у механіці втомного руйнування відносяться до розряду коротких тріщин, загальні закономірності яких є відмінними до властивостей довгих тріщин. Це означає, що параметр ΔK не описує однозначно циклічну тріщиностійкість матеріалу для тріщин різної довжини, тобто її швидкість та пороговий розмах коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) ΔK_{th} . Відповідно складно використовувати в інженерних розрахунках показники механіки втомного руйнування, якщо розглядається широкий діапазон довжин тріщин, включаючи короткі. Врахування ефекту коротких тріщин є дуже важливим та посилюється тією обставиною, що вони за однакових значень ΔK (і, звичайно, однакових інших умов циклічного навантаження, як асиметрія циклу і частота) ростуть швидше, а поріг циклічної тріщиностійкості ΔK_{th} менший, ніж для довгих тріщин. Для прикладу, за розрахунками, виходячи з виявленої довжини тріщини, геометрії елемента конструкції і силових умов навантаження, обчислений рівень коефіцієнту інтенсивності напружень і, відповідно, розмах ΔK_{th} буде нижчим за поріг ΔK_{th} для даного матеріалу, який, у свою чергу, визначили за

експериментальними діаграмами втомного руйнування на зразках з довгими втомними тріщинами. Проте це не означає, що на практиці, навіть якщо реальні умови навантаження відповідають дослідним, немає небезпеки поширення тріщини аж до неконтрольованого руйнування саме через вказаний феномен коротких тріщин. Тому цей аспект необхідно враховувати при використанні підходів механіки втомного руйнування для оцінювання роботоздатності насосних штанг.

Проведено оцінювання ефективності нанесення розробленого ізоляційного композитного покриття насосних штанг згідно з технічними умовами з огляду гальмування росту коротких втомних тріщин. Зразки з короткими тріщинами і нанесеним покриттям для подальшого циклічного навантаження готували наступним чином. На балкових зразках розміром 9 мм x 15.2 мм x 160 мм з боковим концентратором напружень вирощували довгі втомні тріщини за описаною методикою, як це показано на рис. 2.10, *a*, при цьому на кінцевому етапі рівень ΔK_{th} був близьким до порогового. Потім частину зразка з боку концентратора шліфували до розміру 11 мм на довжину 160 мм симетрично відносно концентратора (рис. 2.10, *б*). Таким чином січення робочої частини зразка становило 9 мм x 11 мм і, виходячи з цього, вираховували значення КІН при подальших навантаженнях цього зразка [24].

На рис. 2.11 зображено зразок, підготовлений з боку концентратора для нанесення покриття в подальше циклічне навантаження для визначення КІН. Зразок навантажували до значення $K_{max} = K_{max\ th}$ ($K_{max\ th} = \Delta K_{th}/(1-R)$) і, витримували його під тривалим статичним навантаженням, наносили на верхню частину зразка покриття товщиною 4,2 мм, так щоб загальна висота зразка з покриттям становила 15,2 мм (рис. 2.10, *в*).

На рис. 2.12 зображено зразок із нанесеним покриттям, підготовлений для подальших досліджень для визначення опору росту втомної тріщини.

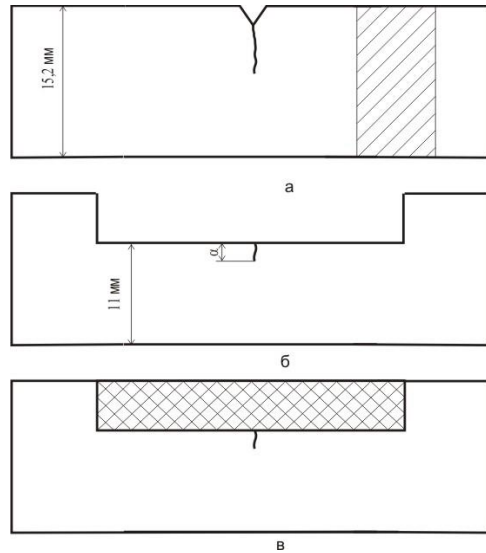


Рисунок 2.10 – Схема зразка з покриттям і короткою тріщиною під ним для наступних випробувань на втомну міцність



Рисунок 2.11 – Зразок із зішліфованою в його робочому діапазоні верхньою частиною з боку концентратора із втомною тріщиною



Рисунок 2.12 – Зразок з короткою втомною тріщиною, закритою нанесеним покриттям

Час витримування зразка під навантаженням становив одну добу, що було гарантією повного формування покриття з відповідними функціональними властивостями.

Фактично штучно створюється ефект закриття тріщини (ЗТ), а такий спосіб гальмування втомного росту тріщин відомий. Він полягає у штучному зменшенні ефективного розмаху ΔK_{eff} заповненням порожнини тріщини речовиною, яка перешкоджає змиканню її берегів впродовж півциклу розвантаження. При цьому зменшується амплітуда деформації матеріалу в зоні передруйнування, що гальмує тріщину. Можливі, два варіанти реалізації способу: а) тріщину заповнюють сипучим дрібнодисперсним твердим порошком; б) розкрити попереднім навантаженням тріщину заповнюють плинною твердою речовиною і витримують під навантаженням до повного затвердіння.

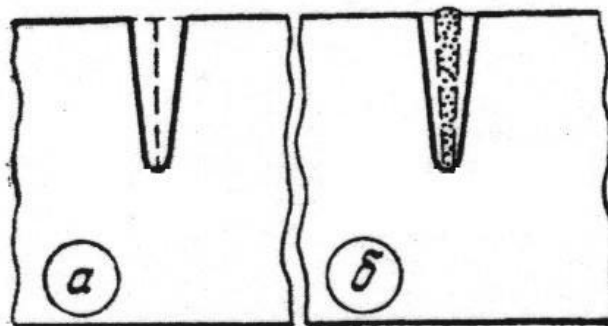


Рисунок 2.13 – Схематичне зображення незаповненої (а) і заповненої (б) порожнини втомної тріщини

На рис. 2.13 – 2.15 схематично показано реалізацію способу. Так, рис. 2.13 ілюструє незаповнену і частково заповнену тріщину твердою речовиною, а рис. 2.14 – відмінності у діаграмах $F - \Delta$ для різних ситуацій: 2.14, а – до заповнення; рис. 2.14, б частково заповнену порожнину тріщини. Нижня вертикальна ділянка діаграм $F - \Delta$ засвідчує закриття тріщини, а це відбивається на ефективному ΔK_{eff} (рис. 2.15).

Таким чином, додатково очікується зміцнювальний ефект від нанесення розробленого покриття з двох причин: механічної накладки (покриття) товщиною 4,2 мм, яка має високу адгезію до поверхні металу, і клинового ефекту затверднувшого епоксидного клею у порожнині тріщини.

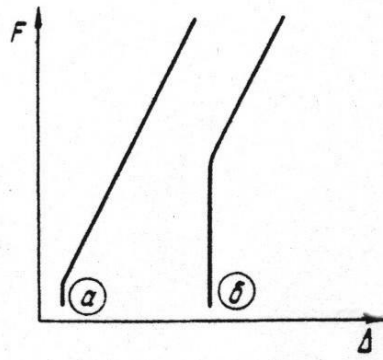


Рисунок 2.14 – Схеми діаграм $F - \Delta$ для незаповненої (а) і заповненої (б) порожнини втомної тріщини

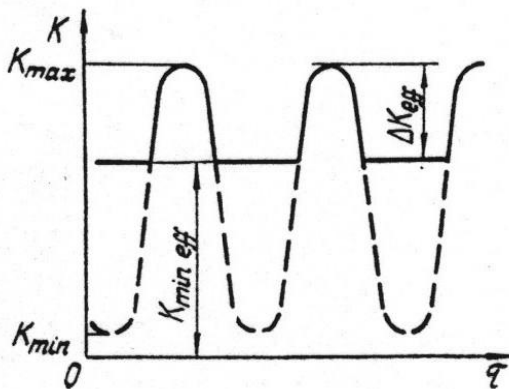


Рисунок 2.15 – Схематичне зображення зміни при циклічному навантаженні номінального (пунктирна і суцільна лінії) та ефективного (суцільна лінія) КІН для частково заповненої порожнини втомної тріщини

Приготовлений таким чином зразок (див. рис. 2.10) піддавали в лабораторних умовах циклічному навантаженню частотою 10 Гц і асиметрії циклу $R = 0,05$. Проведено серію таких експериментів з короткими тріщинами різної довжини. Зразок-композит ступінчато навантажували таким чином, щоби на першій ступені рівень ΔK був дещо нижчим за ΔK_{th} для тріщини даної довжини (див. рис. 2.13). Кількість циклів становила $2 \cdot 10^5$ циклів. Якщо тріщина не проростала за цих умов, про що робили висновок, спостерігаючи за боковими поверхнями, навантаження на зразок підвищували на 10-15 % та піддавали циклічному навантаженню впродовж наступних $2 \cdot 10^5$ циклів. Експерименти з підвищенням навантаження тривали до виявлення росту тріщини на бокових поверхнях. Тоді відповідно до силових умов циклічного

навантаження обчислювали порогове значення $\Delta K_{th}^{нокр}$, властиве зразку з втомною тріщиною конкретної довжини a та з нанесеним покриттям. Різниця у значеннях ΔK_{th} для вихідного (без покриття) і зміцненого $\Delta K_{th}^{нокр}$ зразка показала кількісно ефект від застосування покриття. Результати досліджень приведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порогові значення циклічної тріщиностійкості зразків з короткими тріщинами на сталі 20Н2М з/ та без зміцнювального покриття

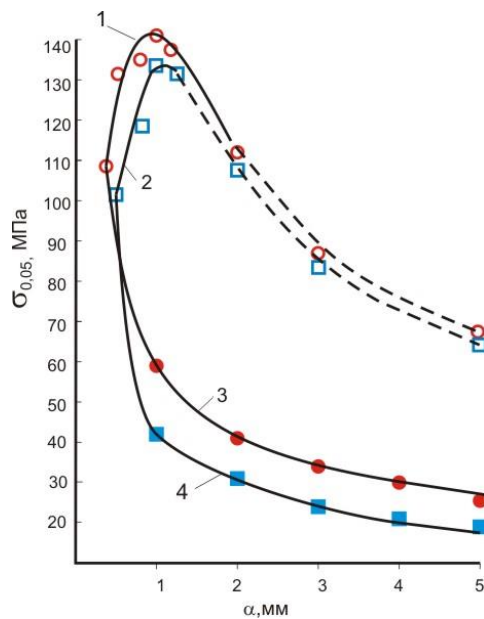
Довжина тріщини, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\Delta K_{th}^{нокр}$, МПа·м ^{1/2}	ΔK_{th} , МПа·м ^{1/2}	$\Delta K_{th}^{нокр}$, МПа·м ^{1/2}
0,28...0,32	3,3	5,7	2,4	5,3
0,48...0,52	5,2	7,5	4,0	7,1
0,78...0,82	6,8	9,8	6,2	9,3
0,99...1,02	8,0	10,7	7,5	10,1
1,18...1,22	8,4	11,8	8,1	11,5

За аналогією з обчисленням границі втоми $\sigma_{0,05}$ на основі експериментальних значень ΔK_{th} для коротких тріщин різної довжини, визначено відповідні значенням $\Delta K_{th}^{нокр}$ величини межі втоми металу з короткими тріщинами з використанням зміцнювального покриття ($\sigma_{0,05}^{нокр}$). Результати обчислень приведені в табл. 2.2.

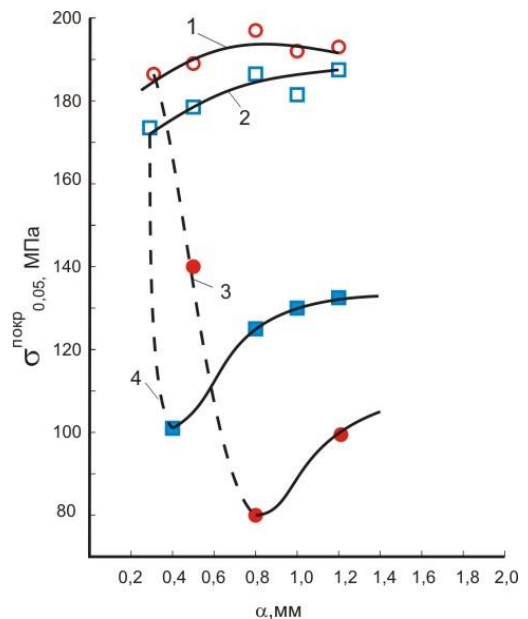
На рис. 2.16 графічно представлені залежності границі втоми $\sigma_{0,05}^{нокр}$ від довжини короткої тріщини, які вказують на істотний вплив нанесення покриття на втомну міцність зразків з короткими тріщинами. Ефект від зміцнення покриттям дещо зростає зі збільшенням довжини тріщини, не так різко як без покриття, при цьому втомна міцність експлуатаційно деградованого металу залишається нижчою за міцність металу у вихідному стані.

Таблиця 2.2 – Значення границі втоми зразків з короткими тріщинами в сталі 20Н2М з/та без зміцнювального покриття

Довжина тріщини, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	$\sigma_{0,05}$, МПа	$\sigma_{0,05}^{покp}$, МПа·м ^{3/2}	$\sigma_{0,05}$, МПа·м ^{3/2}	$\sigma_{0,05}^{покp}$, МПа·м ^{3/2}
0,28...0,32	108	186	78	173
0,48...0,52	131	189	101	179
0,78...0,82	135	196	124	186
0,99...1,02	142	191	134	181
1,18...1,22	136	192	132	187



а



б

1, 3 – вихідний стан; 2, 4 – експлуатований стан; 1, 2 – для пульсуючого навантаження ($R \approx 0$); 3, 4 – для підвищеної асиметрії R

Рисунок 2.16 – Залежності $\sigma_{0,05}^{покp} - a$ для сталі 20Н2М

Важливе також прогнозування зміцнювального ефекту розробленого ізоляційного покриття у випадку підвищеної асиметрії навантаження, коли

ефект ЗТ відсутній. Залежності на рис. 2.16 відбивають сумарний вплив на границю втоми ЗТ і покриття. Завдання полягає у відокремленні цих чинників, оскільки за високої асиметрії навантаження слід брати до уваги позитивний вплив тільки покриття. Для цього припускаємо, що ЗТ не повинно залежати від того, нанесене чи відсутнє покриття. Це оправдано, оскільки ЗТ визначається процесами, притаманними в околі вершини втомної тріщини, і залежить від властивостей металу тощо [32; 33; 67; 66].

Проаналізуємо пороги циклічної тріщиностійкості $\Delta K_{th}^{нокр}$ для різних довжин тріщин після нанесення покриття та порівняємо з відповідними значеннями ΔK_{th} для металу без покриття. Ефект від зміцнення можна подати як:

$$\Delta K_{th}^{нокр} - \Delta K_{th}. \quad (2.6)$$

Відповідно поріг ΔK_{th} складається з двох частин:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th\ eff} + K_{th\ cl}. \quad (2.7)$$

За високої асиметрії циклів навантаження ЗТ відсутнє, тобто $K_{th\ cl} = 0$, а прогнозований поріг втоми буде:

$$\Delta K_{th}^{нокр} - \Delta K_{th} + \Delta K_{th\ eff}. \quad (2.8)$$

Беручи до уваги дані по $\Delta K_{th}^{нокр}$, ΔK_{th} і $\Delta K_{th\ eff}$ (3,3 і 2,4 МПа·м^{1/2} відповідно для вихідного і експлуатованого металу), обчислюємо ефект зміцнення у параметрах КІН стосовно збільшення границі втоми.

Отримані дані приведені в табл. 2.3. Порівняння результатів обчислень для випадку підвищеної асиметрії навантаження (криві 3, 4 на рис. 2.15) з даними для $R = 0,05$ (криві 1, 2) вказує на істотну втрату ефекту за підвищеного R . Незважаючи на істотний розкид даних, зумовлений як специфікою підготування зразків з короткими тріщинами, так і особливостями нанесення покриття, можна в діапазоні коротких тріщин виявити різкий спад порогу втоми для зміцнених покриттям зразків з довжиною втомних тріщин 0,4...0,8 мм, тобто в тому вузькому діапазоні a , де за низької асиметрії спостерігається позитивний вплив ЗТ.

Важливо порівняти прогнозовані для таких умов границі втоми зразків з тріщинами без (рис. 2.16,а криві 3, 4) та з покриттям (рис. 2.16,б криві 3, 4).

Вони вказують на позитивний ефект такого методу зміцнення і у випадку високої асиметрії навантаження.

Таблиця 2.3 - Прогнозовані значення границі втоми зразків з короткими тріщинами на сталі 20Н2М зі зміцнювальним покриттям за підвищеної асиметрії навантаження

Довжина тріщини, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	$\Delta K_{th}^{нокр} - \Delta K_{th \cdot +} + \Delta K_{th \text{ eff}}$, МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{нокр 0,05}$, МПа	$\Delta K_{th}^{нокр} - \Delta K_{th \cdot +} + \Delta K_{th \text{ eff}}$, МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{нокр 0,05}$, МПа
0,28...0,32	5,7	186	5,3	173
0,48...0,52	5,6	140	4,0	100
0,78...0,82	4,0	80	6,2	124
0,99...1,02	6,0	107	7,5	131
1,18...1,22	6,7	110	8,1	132

Таким чином, під дією циклічного навантаження насосних штанг поверхневі короткі тріщини будуть внаслідок навантаження від внутрішнього тиску розкриватись і перший шар покриття епоксидна смола заповнить порожнину тріщини, а після затвердіння вона буде виконувати роль клина. Це при циклічному навантаженні зменшує циклічну деформацію сталі в околі вершини тріщини, що призводить до підвищення опору поширенню втомної тріщини та її гальмуванню. Нанесене на зразок покриття додатково створює зміцнювальний ефект, оскільки має високу адгезію до поверхні сталі, що збільшує захисні властивості покриття [24; 25; 34; 41; 67; 72; 95-97].

2.5 Методика визначення фізико-механічних властивостей захисних покриттів

На поверхню штанги в процесі ремонту може наноситися металеве та неметалеве покриття. Після нанесення металевого покриття насосна штанга має кращу твердість поверхні, велику силу зчеплення та високу корозійну стійкість до агресивного середовища в процесі експлуатації у свердловині. Алюміній, цинк, неіржавіюча сталь, хромонікелевий сплав, міднонікелевий сплав, алюмінієву бронзу використовують для металевого покриття (таблиці 2.4 та 2.5) [25].

Таблиця 2.4 - Металеві покриття і їх характеристики

Матеріал покриття	Характеристики покриття
Алюміній	Стійкий до кисню, солей, CO ₂ і H ₂ S, має електрохімічну корозійну стійкість
Цинк	Те ж саме
Алюмінієва бронза	Стійкий до морської води, сірчаної і соляної кислоти, має високу зносостійкість
Неіржавіюча сталь	Стійкий до окислення, пари, CO ₂ , O і NH ₃ , має високу зносостійкість
Хромонікелевий сплав	Стійкий до окислення, пари, CO ₂ , O, H ₂ S і NH ₃ , має високу зносостійкість
Мідно-нікелевий сплав	Використовується як основне антикорозійне покриття, антикорозійні характеристики в 10-40 разів вищі, ніж у неіржавіючої сталі

Для прикладу, алюмінієве покриття в корозійному середовищі H₂S насичений водний розчин +0.1%HCN (синільна кислота) +5%NaCl (сіль)

+0.5%CH₂COOH (оцетова кислота) - швидкість корозії насосної штанги з покриттям складає 1/6-1/5 швидкості корозії штанги з вуглецевої сталі [5].

Високою корозійною стійкістю і низькою питомою масою відрізняється неметалеве покриття. Для неметалевого покриття використовуються такі матеріали як поліетилен високого тиску, поліуретан, поліамід та епоксидна смола [11; 32; 67; 88; 114].

Таблиця 2.5 - Неметалеві покриття та їх характеристики

Матеріал покриття	Характеристики покриття
Поліетилен високого тиску	Чудовий антихімічний реагент та електричний ізолятор
Поліуретан	Чудовий антихімічний реагент та покриття проти старіння (стабілізатор)
Епоксидна смола	Чудовий антихімічний реагент та електричний і механічний ізолятор
Поліамід	Антихімічний реагент

Для захисту насосних штанг від дії агресивного середовища традиційно не використовували жодного ізоляційного покриття. Останнім часом приділяється велика увага розробкам, пов'язаним із способами протикорозійного захисту та захисту від механічних пошкоджень. Практично кожна насосна штанга експлуатується у важких умовах: піддаються механічному зношуванню у викривлених свердловинах та корозійному спрацюванні від агресивного середовища в свердловині.

Основний об'єкт досліджень – ізоляційне композитне покриття «ІКП», яке являє собою конструкцію на основі епоксидної смоли, армованої склотканиною. Епоксидна смола була вибрана марки ЕДТ-10 ОСТ 92-0957, склотканина конструкційна – структури 10 на замаслювачі № 80 Т-10-80 виготовлена згідно ГОСТ 19170-73. Поліуретанове покриття наносять на отримане склопластикове

покриття, наприклад, 3м Scotchkote 352 в такому порядку: спочатку – шар підігрітого до 60° С компонента А (основи), а зверху – підігрітого до 15° С компонента Б (затверджувача) поліуретану, співвідношення компонентів складає 3:1.

Визначали наступні фізико-механічні властивості ізоляційного композитного покриття. Твердість ізоляційного покриття на сталевих пластинах вимірювали маятниковим приладом МЭ, ударну в'язкість 101 вимірювали приладом У2-Т, адгезію покриттів до сталеві поверхні досліджували методами ґраткових надрізів. Визначали ізоляційні та протикорозійні властивості ізоляційного покриття. В процесі тривалої витримки ізоляційного композитного покриття у водневих середовищах визначали водопоглинання і хімічну тривкість пароводопоглинання за відомою методикою [88]. Визначали перехідний електричний опір ізоляційного композитного покриття та діелектричну суцільність. Питомий об'ємний електричний опір при водопоглинанні визначали за методиками [88].

Випробування проводиться за допомогою скануючого електроду, на який подається постійна чи імпульсна висока напруга для виявлення пористості (несуцільності) покриття потрібної товщини. Пористість визначається за допомогою іскри, що проскакує між металом штанги і електродом в дефектних місцях покриття, а також світловим чи звуковим сигналом, що видає дефектоскоп.

Використовували дефектоскоп регульованої високої напруги зі звуковим чи світловим сигналом та товщиномір типу В-12 електромагнітний або магнітний, що забезпечує точність вимірювання до 10 %. Калібрування такого приладу виконується на металі в місці нанесення покриття, по діапазону товщини покриття, що контролюється. Кожного разу при зміні товщини покриття необхідно калібрувати вимірювальний прилад для забезпечення надійності вимірювань.

Вимірювання проводили на 10% насосних штанг в 4 точках по периметру. На кожній насосній штанзі, що досліджується, необхідно провести 3 групи

замірів: поблизу кожного краю покриття по одному принаймні на відстані в 500 мм від краю і одну посередині насосної штанги. Дослідження слід проводити тільки на сухій поверхні. Дослідження проводили в такій послідовності: заземлили прилад і штангу, ввімкнули живлення, подати високу напругу на скануючий електрод і переміщали його, по поверхні з покриттям, що контролюється. Відносна швидкість переміщення електроду по поверхні покриття повинна бути не більше 0,2 м/с. Відмітили дефекти металу, виявлені пробоем чи звуковим або світловим сигналом. Захисне покриття вважають таким, що витримало випробування, якщо при переміщенні по поверхні штанги електроду, на який подана необхідна висока напруга, відсутній пробій покриття. Дефекти ізоляційного покриття носять як локальний (поодинокі дефекти), так і зональний характер.

Колона насосних штанг (КНШ) є однією із найслабших елементів свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Насосні штанги різко обмежують надійність і довговічність штангової насосної установки. Це пов'язано із важкими умовами роботи насосних штанг в свердловині. Тому, проблема забезпечення надійності та довговічності колони насосних штанг є надзвичайно актуальною. Важливе практичне та теоретичне значення для вирішення цієї проблеми є розробка нових прогресивних технологій ремонту насосних штанг [41, 72, 95-97].

Найпоширенішими причинами руйнування насосної штанги є поступове зростання невеликих тріщин аж до досягнення ними критичної довжини. Тому особливо важливо запропонувати методи підвищення опору росту таких тріщин, а також їх гальмування. А також потрібно розробити методику за допомогою якої можна прогнозувати ресурс насосних штанг як сталевих, так і композитних [24; 25; 67; 76].

2.6 Висновки до розділу 2

З інженерного погляду проблема коротких тріщин винятково важлива, оскільки неврахування її прискореного розвитку при розрахунках довговічності виробів може привести до неоправданого завищення прогнозованого ресурсу та переоцінці експлуатаційної надійності конструкцій.

В міру збільшення терміну експлуатації насосних штанг відбувається деградація деяких важливих властивостей матеріалів, найістотніше, характеристик опору крихкому руйнуванню. Це стосується і циклічної тріщиностійкості сталей. Спочатку зароджуються мікротріщини, які, досягнувши критичного розміру, призводять до незворотної пошкодженості матеріалу та до повної експлуатаційної деградації металу насосних штанг [11; 32; 66; 67].

Нанесене на зразок покриття додатково створює зміцнювальний ефект, заповнюючи порожнину тріщини, а після затвердіння виконує роль клина, що в свою чергу зменшує циклічну деформацію сталі в околі вершини тріщини та призводить до її гальмування [5; 21; 22; 24; 25; 67; 76].

Матеріали, наведені у даному розділі, відображено у таких публікаціях:

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 1(34). С.120-125.

3 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Нафтогазова енергетика. 2017. № 2(28). С.27-30.

4 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017*: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С.135-136.

5 Стефанишин А.Б., Бакун Б.М., Копей Б.В. Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення. *Молодь: наука та інновації*: Матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (Дніпро, 15-16 листопада 2018). Дніпро, 2018. С. 45-46.

6 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Відновлення властивостей дослідних зразків насосних штанг після експлуатації. *Сучасний рух науки*: Тези доп. V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Дніпро, 7-8 лютого 2019). Дніпро, 2019. С.335-338.

РОЗДІЛ 3

ПОВНІ ДІАГРАМИ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ ТА ОПІР СТАЛЕЙ ДЛЯ НАСОСНИХ ШТАНГ РОСТУ КОРОТКИХ ВТОМНИХ ТРІЩИН

Як відомо, процес руйнування елемента конструкції складається зі стадій зародження тріщини, її критичного (контрольованого) росту та остаточного (неконтрольованого) зламу, а загальна довговічність визначається тривалістю двох перших стадій. Це загальне правило поширюється і на втомний ріст тріщин, в тому числі і в матеріалах штангових сталей.

Аналіз працездатності та розрахунок залишкової довговічності насосних штанг часто проводять із врахуванням закономірностей втомного росту тріщин. Це зумовлено циклічним навантаженням на насосну штангу. Зазначимо, ріст тріщин за втомного руйнування у штангових сталях безпосередньо залежить від тривалого статичного навантаження, особливо під дією корозійно-агресивного середовища, тобто корозійного розтріскування. Разом з тим, циклічне навантаження може не тільки зумовлювати окремий механізм руйнування, але і підсилювати корозійне розтріскування сталей. Відомо, що тріщини, які виникають під дією корозійно-агресивного середовища тупіші за втомні та часто розгалужені, Це утруднює їх ріст через зниження концентрації напружень. В цей же час циклічне навантаження, навіть якщо воно нетривале, буде такі тріщини робити тупішими та сприяти їх росту [24; 25; 32; 35].

3.1 Побудова повних діаграм втомного руйнування матеріалів насосних штанг

Більше половини діючого фонду механізованих свердловин у нафтовій галузі складають свердловини, які обладнані штанговими свердловинними насосами і їх кількість постійно зростає.

В процесі експлуатації таких свердловин виникає цілий ряд ускладнень, які часто призводять до аварійних ситуацій зі штангами. Штангова колона – одна з

основних ланок у штангових свердловинних насосних установках (ШСНУ), і від їх довговічності та надійності залежить видобуток нафти та її собівартість.

Зростання числа аварій, пов'язаних з штанговими колони ШСНУ, вказує на необхідність контролю стану насосних штанг. Це в свою чергу дозволить зменшити аварійність штангової колони, а іноді і попередить її. Напруження у штангах змінюються за асиметричним циклом і призводять до явищ корозійної втоми. Корозійно-втомне руйнування насосних штанг характеризується зародженням, розвитком тріщини і раптовим руйнуванням в ослабленому перерізі.

Результати корозійно-втомних випробувань насосних штанг ШСНУ є випадковими величинами, тому оцінку характеристик опору втомі потрібно проводити з врахуванням розсіювання їх довговічності. Процес втомного руйнування визначається рівняннями кривої втоми, які мають вигляд [1]:

$$N = \frac{Q}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_{zp}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (3.1)$$

$$N = N_\sigma \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_{zp}}{V} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (3.2)$$

також описується функцією нормального розподілу границі витривалості:

$$\sigma_r = \sigma_{r \min} + t \cdot s_{\max}, \quad (3.3)$$

де N – кількість циклів до руйнування;

σ – амплітуда змінного напруження циклу;

Q, V_0 – параметри кривої втоми згідно рівняння (3.1);

σ_{zp} – значення границі витривалості, яке відповідає ймовірності неруйнування P ;

N_σ, V – параметри кривої втоми згідно рівняння (3.2), що характеризують кількість циклів до точки нижнього перегину та кут нахилу лівої вітки кривої втоми;

$\sigma_{r \min}$ – нижня границя інтервалу довіри для середнього значення межі витривалості;

S_{max} – верхня границя інтервалу довіри для середньоквадратичного відхилення значень границі витривалості;

t – квантиль нормального розподілу, який відповідає ймовірності неруйнування P .

Між параметрами рівнянь (3.1) і (3.2) для сукупності однотипних виробів існують наступні залежності:

$$Q = \sigma_{zp} \cdot V / (\sigma_{zp} - V), \quad (3.4)$$

$$V_o = \sigma_{zp} \cdot V / (\sigma_{zp} - V). \quad (3.5)$$

Обробка даних проводилась на ЕОМ, в результаті якої отримані такі значення параметрів Q , V_o , σ_{zp} , а також значення: мінімально необхідної бази випробувань – $N_\sigma = Q / \sigma_{zp}$; фактична база, яка повинна бути рівною чи більшою за необхідну ($N_\phi > N_\sigma$); довірчі інтервали математичного очікування границі витривалості $M[\sigma_T] = \sigma_T \pm t_1 \cdot S \sqrt{n}$; середньоквадратичне відхилення границі витривалості S і довірчий інтервал для нього $z_1 S < S < z_2 S$; коефіцієнт варіації границі витривалості $V_u = S / \sigma_T$; оцінка точності апроксимації α .

Побудовані теоретичні криві втоми за допомогою знайдених теоретичних значень параметрів Q , V_o , σ_r , які відповідають математичному очікуванню σ_r , його верхнім і нижнім довірчим значенням $\sigma_r \pm t_1 \cdot S \sqrt{n}$. На ЕОМ вираховували координати точок кривих. Рівняння Почтенного Є.К. не застосовували для опису результатів корозійно-втомних випробувань, особливо натурних об'єктів.

За допомогою трипараметричного рівняння Почтенного Є.К. та методичних рекомендацій МР55-82 [25] проведено розрахунок характеристики розсіювання витривалості композитних та сталевих насосних штанг, випробуваних в корозійних середовищах (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Характеристики розсіювання витривалості насосних штанг із сталі і склопластика

Тип штанг	$\sigma_{\text{сер}}$, МПа	σ_{min} , МПа	σ_{max} , МПа	V_o , МПа	Q, МПа 10^6 цикл.	N_6 , МЛН цикл.	S, МПа	$V=S/\sigma_{\text{сер}}$
НШ22 20Н2М	69,6	53,68	85,52	100	10,0	1,436	22,25	0,319
МПШ22 ПКМ	61,58	51,86	71,3	18	10,0	1,623	7,83	0,124

На основі проведених випробувань композитних та сталевих (рис.3.1) насосних штанг побудовані повні діаграми втомного руйнування насосних штанг з імовірнісною оцінкою $P(N)$ їх довговічності (рис.3.2, рис.3.3), за допомогою яких можна проводити прогнозування їх ресурсу.

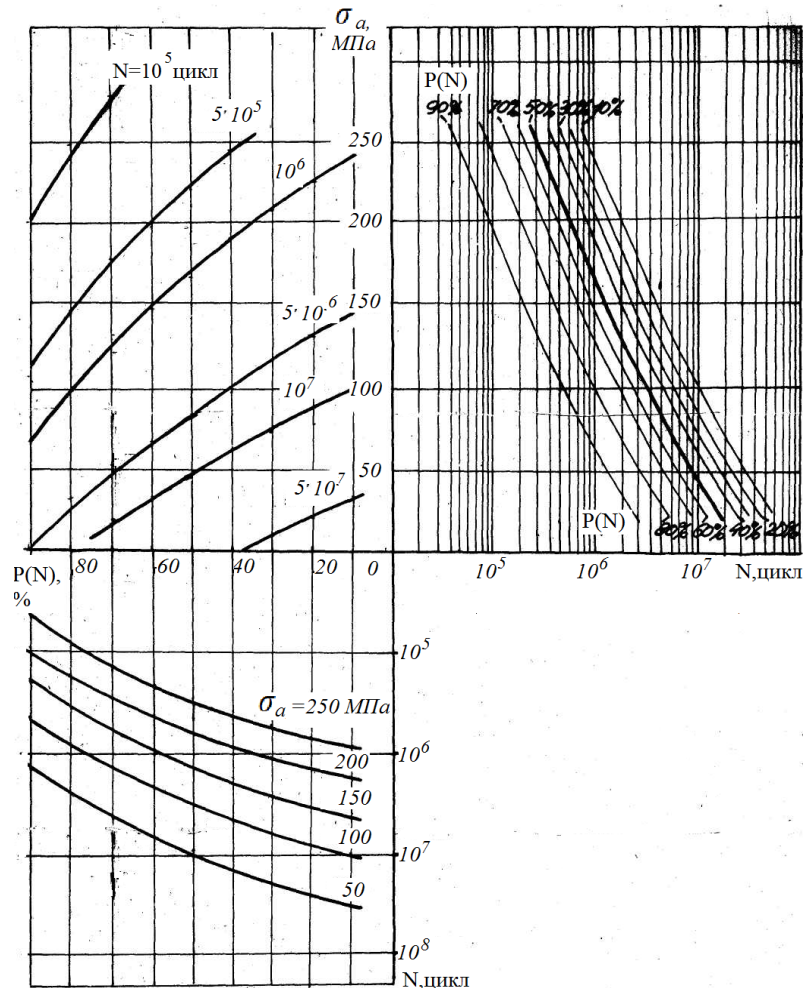


Рисунок 3.1 - Повна діаграма корозійно-втомного руйнування насосних штанг діаметром 22 мм зі сталі 20Н2М, побудована на основі розподілу Вейбула

На ЕОМ розраховані характеристики втоми за результатами проведених випробувань натурних насосних штанг діаметром 22 мм із сталі 20Н2М в повітрі та корозійному середовищі ($\sigma_r=187,6$ МПа, $Q=8,9 \cdot 10^6$ МПа·цикл, $V_o=170,7$ МПа) і корозійної втоми ($\sigma_{rk}=14,2$ МПа, $Q=56,7 \cdot 10^6$ МПа·цикл, $V_{ok}=55,74$ МПа). Результати таких випробувань можна описати за допомогою рівняння (3.1). Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування рівняння для опису кривих корозійної втоми, зокрема ділянки до перегину кривої. Досвід використання рівнянь (3.1) і (3.2) показує, що при обробці результатів втомних досліджень друге рівняння дає добрі результати середнього значення границі витривалості, але занижені результати оцінки середньо-квадратичного відхилення. Це рівняння є простим для складання програм на ЕОМ, а більш наочними є параметри цього рівняння. Тому для більш точної статистичної оцінки необхідно використовувати рівняння (3.1).

На рис. 3.2. наведена повна діаграма опору циклічному згину склопластикових насосних штанг діаметром 22мм при обертанні з використанням рівняння (3.1).

На рис.3.3 наведена повна діаграма опору циклічному згину сталевих насосних штанг (Сталь 20Н2М) діаметром 22мм при обертанні [25; 33; 53; 54; 57].

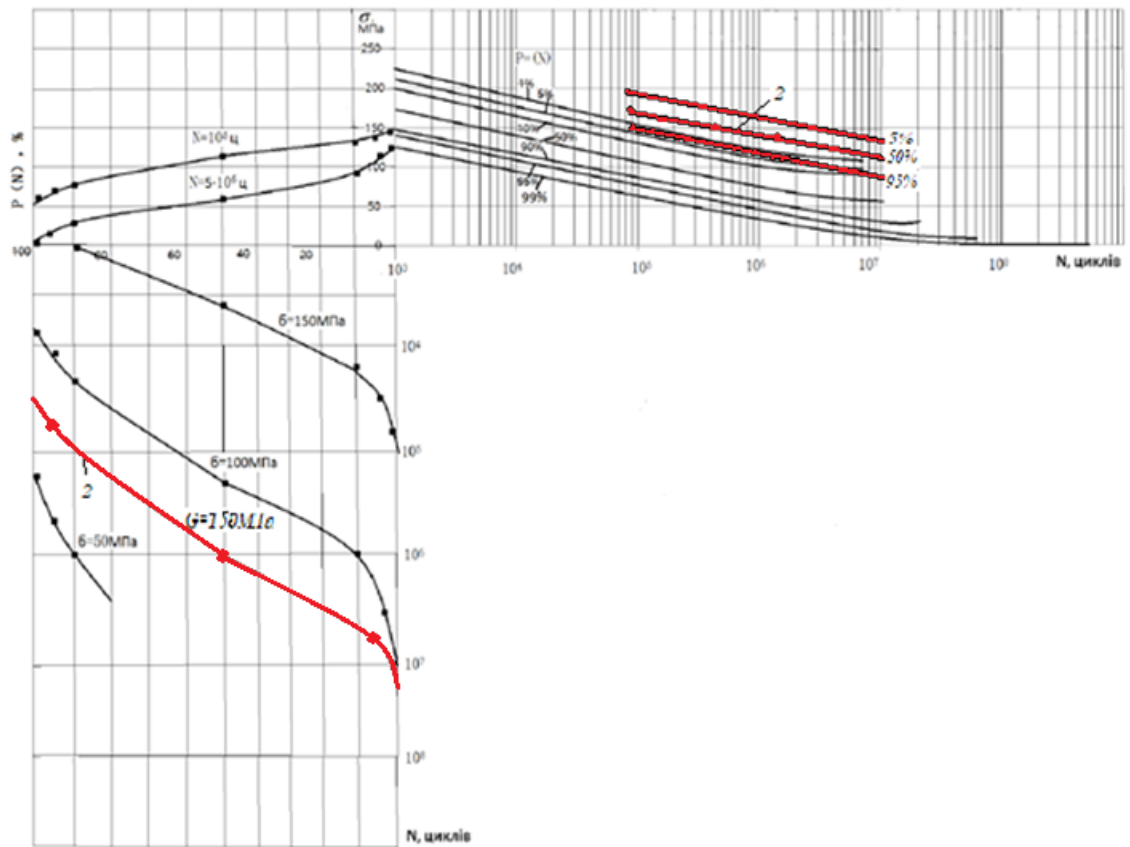


Рисунок 3.2 - Повна діаграма втоми при циклічному згині склопластикових (1) та гібридних (2) насосних штанг

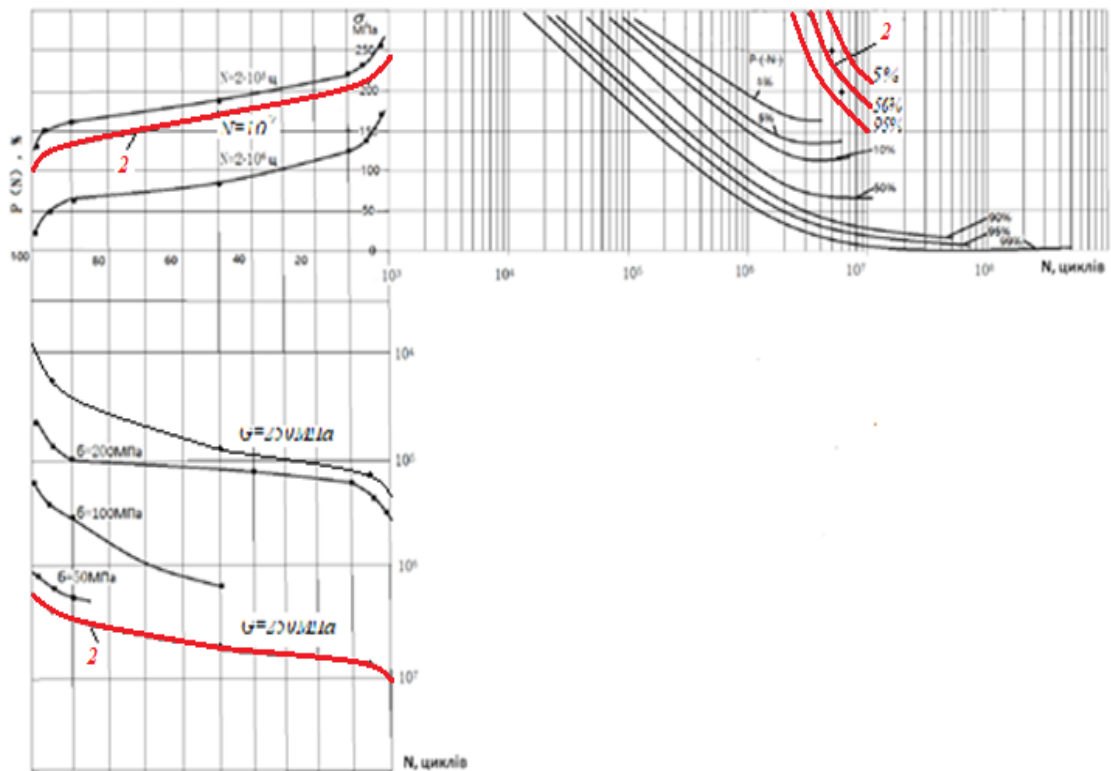


Рисунок 3.3 - Повна діаграма втоми при циклічному згині сталевих насосних штанг нових (1) та ремонтних (2)

Побудовано діаграми втомної міцності гібридних насосних штанг при циклічному згині в порівнянні із склопластиковими насосними штангами на основі отриманих результатів (рис.3.4). [18; 19; 24; 25].

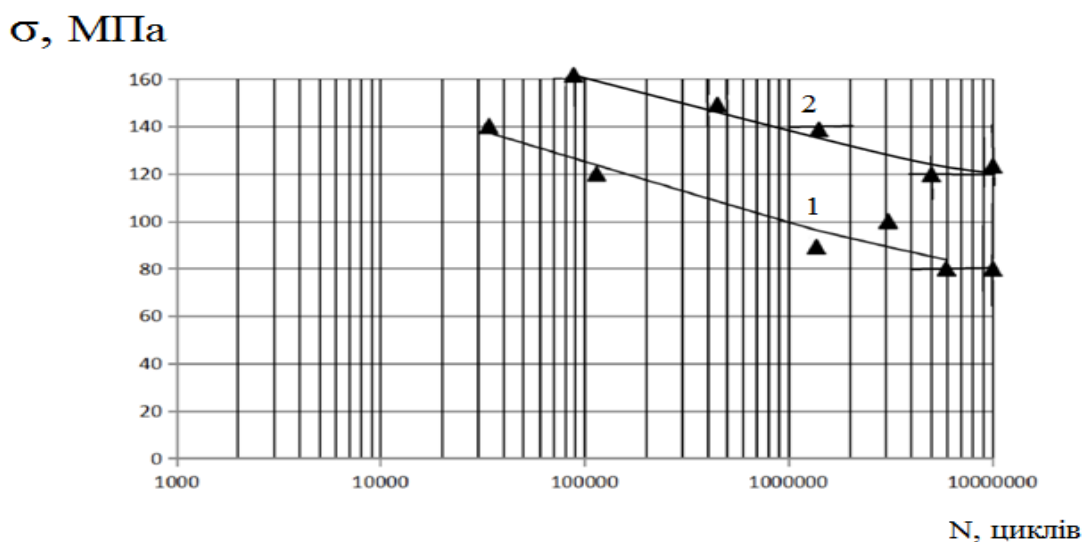


Рисунок 3.4 – Діаграми втомної міцності насосних штанг при циклічному згині: склопластикових (крива 1) та гібридних (крива 2)

За допомогою розроблених методик і комп'ютерної програми можна прогнозувати ресурс насосних штанг виготовлених із сталі, склопластику, а також гібридних та визначити періодичність проведення їх дефектоскопії, що дозволить попередити аварійні ситуації та раціонально використовувати насосні штанги при видобуванні нафти зі свердловини.

3.2 Визначення границі втоми сталі насосних штанг з короткими тріщинами

Є відомою процедура визначення границі втоми матеріалу з використанням підходів механіки руйнування та врахування ефекту коротких втомних тріщин. Суть методу полягає у вирощенні від концентратора напружень (геометричного надрізу) пульсуючим стисненням ($R = - \sim$) короткої втомної тріщини з наступним ступінчатим навантаженням пульсуючим чи близьким до того розтягом. За такого розтягу короткої тріщини вона буде стартувати за деякого

рівня ΔK , який є пороговим ΔK_{th} для заданої довжини тріщини a . Цей ріст тріщини в межах діапазону коротких тріщин порджує зростання ЗТ і, відповідно, для її подальшого росту з пороговою швидкістю необхідний вищий рівень навантаження. Таким чином будують R -криві втоми, як залежності ΔK_{th} – приріст тріщини Δa . Вирощуючи стисненням короткі тріщини різної довжини, побудовано залежності для серії коротких тріщин (рис. 3.5). Тоді, використовуючи відому залежність механіки руйнування:

$$K = \sigma (\pi a)^{1/2}. \quad (3.6)$$

Можна визначити за відомим значенням ΔK_{th} границю втоми, виходячи з логіки, що якщо коротка тріщина не буде розвиватися під час циклічного навантаження впродовж випробувань, то і зразок не зруйнується.

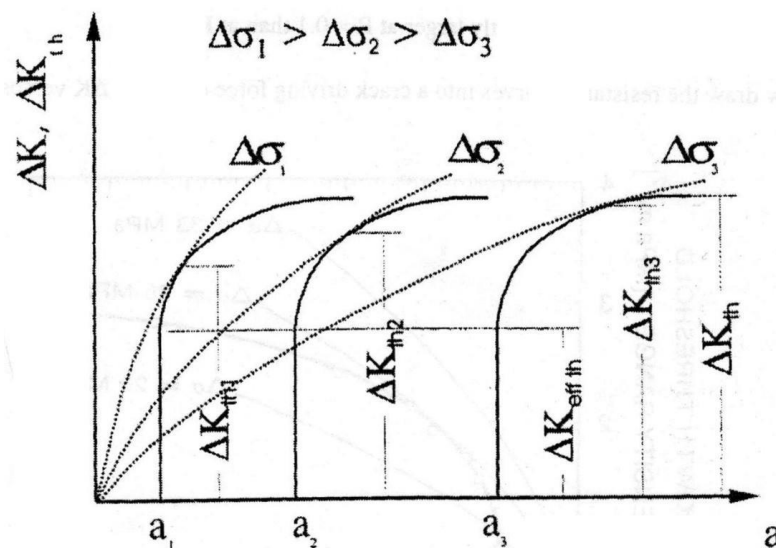


Рисунок 3.5 – Схематична ілюстрація визначення границі втоми залежно від розміру короткої тріщини (дефекту)

Використано такий підхід до визначення границі втоми, проте наш метод побудований не на вирощуванні коротких тріщин стисненням, а виконанням вузької, шириною 0,2 мм, прорізі вздовж тріщини. Перевага нашого методу в тому, що відкидаються можливі сумніви у коректності попереднього вирощування тріщин стиском, оскільки у пластичній зоні такої тріщини розподіл залишкових напружень складний та відмінний від розподілу напружень

при вирошуванні тріщини розтягом. Це може накласти свій відбиток на розподіл напружень при наступному циклічному навантаженні для побудови R -кривої. Проте нами використано залежність (3.6) для визначення границі втоми металу $\sigma_{0,05}$ (для асиметрії $R = 0,05$) з короткими тріщинами на основі відомих значень ΔK_{th} (табл. 3.2) [65-67; 76].

Таблиця 3.2 – Розраховані значення границі втоми сталі з короткими тріщинами різної довжини

Довжина тріщини, мм	Вихідний стан		Експлуатований стан	
	$\Delta K_{th},$ МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,05},$ МПа	$\Delta K_{th},$ МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{0,05},$ МПа
0,28...0,32	3,3	108	2,4	78
0,48...0,52	5,2	131	4,0	101
0,78...0,82	6,8	135	6,2	124
0,99...1,02	8,0	142	7,5	134
1,18...1,22	8,4	136	8,1	132
1,78...1,82	8,4	112	8,1	108
3,0	8,4	87	8,1	84
5,0	8,4	67	8,1	65

3.3 Гальмування росту коротких тріщин нанесенням захисного покриття

У даний час широко використовуються полімерні композиційні матеріали (ПКМ) на основі поліуретанів (ПУ) і різних наповнювачів в машинобудівній, нафтопереробній, будівельній, та легкій промисловості. Вони характеризуються підвищеною хімічною, механічною і корозійною стійкістю, хорошими діелектричними властивостями, можуть бути як високоеластичними, так твердими і міцними. Всі ці якості сприяють їх конкуренції з природними матеріалами.

Ізоціанат міститься у складі поліуретанів та реагує з водою (якщо вона є на покритій поверхні), чим попереджається розвиток корозії та зниження адгезії. Тому, бажано для захисту від корозії металоконструкцій (особливо сталевих) застосовувати поліуретанові лаки.

Для вирішення різноманітних завдань поліуретан використовується практично у всіх галузях промисловості. Однією з таких задач є захист деталей механізмів від корозії, ударного навантаження, впливу агресивних середовищ і абразивного зносу. Захист поверхні може бути у вигляді поліуретанового покриття, яке наноситься безпосередньо на поверхню та дозволяє збільшити термін експлуатації деталі, а також легко відновлюється у випадку стирання [24; 41; 70].

З метою захисту металоконструкцій від корозії у ряді країн застосовуються пінополіуретанові покриття. Поліуретанові покриття, як показав досвід, протягом декількох років зберігають первинний блиск, не стираються, легко очищаються від забруднень, не жовтіють. Наносити пінополіуретан на поверхню найдоцільніше напиленням, оскільки це збільшує ефективність та якість покриття, а також сприяє значному підвищенню продуктивності праці.

За допомогою пістолетів безповітряного або повітряного розпилювання накаткою або пензлем наносять антикорозійні поліуретанові покриття. Висихання поліуретанових композицій складає від 4 до 24 год. При складанні і використанні поліуретанових композицій потрібно швидко і ретельно очищати використану технологічну апаратуру відразу після нанесення покриття, а також необхідно строго дотримуватися вимог техніки безпеки у зв'язку з токсичністю речовин деяких компонентів рецептури. Покриття потрібно наносити розпилюванням на поверхню штанги, попередньо очищену металевими щітками. Покриття можна наносити на штангу в декілька шарів, що дозволяє скоротити термін проведення робіт [25; 70].

Антикорозійні поліуретанові покриття широко використовуються і за кордоном. Поліуретанові лаки наносять на палуби і палубні надбудови, а також внутрішні поверхні димарів вантажних суден і танкерів. Успішно застосовується

на танкерах і рефрижераторах чотиришарове покриття: перший шар — епоксидна ґрунтовка, другий — поліуретан, третій і четвертий шари — поліуретан великої жорсткості. Завдяки стійкості до дії нафтопродуктів, олив та мийних засобів, незаймисті і зносостійкі поліуретанові покриття почали наносити в машинних відділеннях суден. В Англії розроблено та використовується пінополіуретанове покриття на основі ізоціаната «Супросек 1160» і поліефірів «Дальтолака 1180» і «Дальтолака 2190» з додаванням касторової олії і епоксидної смоли для підвищення стійкості до дії води і агресивного середовища; пігментом є окис заліза. Таке покриття застосовується в різних галузях машинобудування. У Німеччині пінополіуретанові покриття використовують для нанесення на магістральні підземні трубопроводи. При цьому одночасно відбувається захист від корозії та їх теплоізоляція. Раніше такі трубопроводи, які піддаються руйнівній дії конденсаційної вологи фарбували, причому через кожні два- три роки доводилося відновлювати фарбування, що було дуже трудомістким процесом. [69; 70; 95].

В розділі вирішено питання визначення границі втоми сталі насосних штанг з короткими тріщинами, а також гальмування росту коротких тріщин нанесенням захисного покриття. В зв'язку з цим потрібно провести дослідження довговічності штанги від глибини тріщини без врахування дотичного напруження та з його врахуванням, а також оцінку критичної довжини тріщини та розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги з врахуванням дотичних напружень залежно від величини крутного моменту. Також важливо вирішити проблему з оцінювання граничного стану насосних штанг, які піддаються одночасному впливу статичних і циклічних навантажень, особливо асиметричного навантаження.

3.4 Висновки до розділу 3

Розроблене ізоляційне композитне покриття насосних штанг виконує не тільки функцію протикорозійного захисту, але і механічно зміцнює поверхню насосної штанги [5; 11; 25; 24; 69; 70].

Проведені натурні випробування і побудовані повні діаграми втомного руйнування на основі кривих корозійної втоми сталевих та композитних насосних штанг, що дозволяють визначати довговічність штанг при дії змінного навантаження [20; 18; 12; 24].

Комп'ютерна програма і розроблені методики дають можливість прогнозувати ресурс сталевих і композитних насосних штанг та визначати періодичність проведення їх дефектоскопії. Це дозволить значно зменшити кількість аварійних ситуацій та раціонально використовувати насосні штанги в процесі експлуатації. [16; 24].

Матеріали, наведені у даному розділі, відображено у таких публікаціях:

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 1(34). С.120-125.

3 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017*: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С.135-136.

4 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Рачкевич І.О. Розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №3(64) . С.50-56.

5 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №4(65). С.20-25.

6 Б. В. Копей, А. Б. Стефанишин, Т. П. Венгринюк. Втомна міцність гібридних насосних штанг. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2018. № 4. С.117-122.

7 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Втомна міцність гібридних насосних штанг при циклічному розтязі та згині. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017)*. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 121-122.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ

Більшість нафтових свердловин України оснащені штанговими свердловинними насосними установками (ШСНУ). Визначальною умовою для забезпечення ефективної та надійної роботи ШСНУ є надійність колони насосних штанг в ускладнених умовах роботи та її ремонтпридатність, надійність приводу і його функціональні можливості. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг покращить показники їх функціонального призначення, забезпечить ефективну роботу установки та її експлуатаційні характеристики .

Надійність колони насосних штанг протягом заданого ресурсу пов'язана із вирішенням широкого спектру завдань. У першу чергу це відноситься до вдосконалення методів розрахунку на міцність та довговічність штангової колони, а також дослідження технічних характеристик використовуваних матеріалів з урахуванням особливостей експлуатації насосних штанг. Режими навантаження штангової колони в реальних умовах залежать від конкретних умов експлуатації. Їх аналіз свідчить про широкі спектри комбінацій навантаження, що включає циклічні в поєднанні зі статичними навантаженнями, що зазвичай призводить до руйнування матеріалу від втоми. Небезпека такого роду руйнування полягає в тому, що воно розвивається при відсутності помітних деформацій матеріалу.

Колона насосних штанг при роботі в свердловині працює в умовах дії складного напруженого стану та появи напружень, які виникають від прикладання зусиль розтягу, згинальних та крутних моментів. Використання обертачів колони насосних штанг обумовлено необхідністю рівномірного спрацювання штанг і муфт та попередження відкладень парафіну, асфальто-смолистих речовин і при їх застосуванні виникають значні крутні моменти [25; 93].

4.1 Прогнозування ресурсу насосних штанг з короткими тріщинами

В тілі насосних штанг внаслідок дії змінних напружень розтягу, згину та кручення зароджуються та ростуть втомні тріщини, закономірності росту яких описуються кінетичною діаграмою втомного руйнування [2; 25]. Кінетична діаграма втомного руйнування дозволяє оцінити міцність і довговічність насосних штанг, а також опір матеріалу втомному руйнуванню. На S - подібній кривій (рис. 1) можна розрізнити три зони:

- низькоамплітудну зону I, де $\Delta K = \Delta K_{th}$, тобто при пороговому коефіцієнті інтенсивності напружень, при якому не спостерігається ріст тріщин або

$$\frac{dl}{dN} = 0;$$

- зона II середніх швидкостей росту тріщин, що описується степеневою залежністю Паріса $\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m$,

де $m \approx 3-5$; для вуглецевих сталей при $m = 4$.

$$C \approx (\sigma_B K_{Ic})^{-2}, \quad (4.1)$$

де σ_B - межа міцності сталі при розтязі, K_{Ic} - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень;

- високоамплітудну область III з прискореним розвитком тріщини до повної поломки.

Коефіцієнт інтенсивності напружень K_I , що характеризує стан деяких механічних властивостей матеріалу в околі вершини тріщини в найпростішому випадку плоскої деформації розтягу нескінченного тіла з наскрізною прямолінійною тріщиною довжиною $2l$ визначається за формулою:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (4.2)$$

де σ - діюче напруження.

Для напівеліптичної тріщини, що найбільш характерна для валів, насосних штанг тощо, користуються формулою Аокі і Кіучі [3; 4]:

$$K_1 = 1,12\sigma_{max} \sqrt{\frac{\pi \cdot h}{\sqrt{Q}}} \quad (4.3)$$

$$Q = \left(\frac{3}{8}\pi + \frac{\pi \cdot l^2}{8h^2} \right)^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \quad (4.4)$$

σ_{max} - сумарне максимальне напруження; h - глибина тріщини;
 l - напівдовжина тріщини.

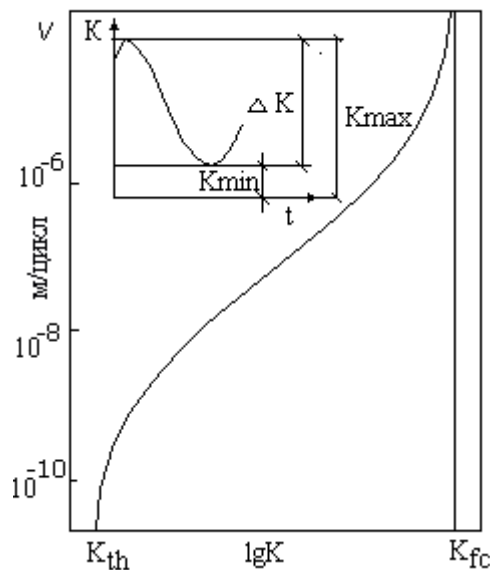


Рисунок 4.1 - Кінетична діаграма втомного руйнування

Знаходимо критичну глибину тріщини, коли настає її катастрофічний ріст, при $K_I = K_{Ic}$:

$$h_{кр} = \left(\frac{K_{Ic}}{1,12\sigma_{max}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \sqrt{Q} \quad (4.5)$$

термін експлуатації деталі з тріщиною в циклах навантаження:

$$N = \int_{h_{поч}}^{h_{кр}} \frac{dh}{c \cdot (K_{max})^m} \quad (4.6)$$

де $h_{поч}$ і $h_{кр}$ - розміри початкової і критичної глибини тріщини.

Приклад розрахунку

Визначаємо залишковий ресурс насосної штанги діаметром 22 мм ГОСТ 13877-96, яка має такі механічні властивості: ($\sigma_B=588$ МПа, $\sigma_{0,2}=382$ МПа, $\psi=56\%$, $\delta_5=21\%$, НВ 200).

Нехай в насосній штанзі при роботі в свердловині виникають осьові напруження розтягу величиною $\sigma_p=120$ МПа, циклічні напруження згину в викривленій ділянці свердловини становлять $\sigma_{32}=250$ МПа. Припускаємо, що в тілі насосної штанги є поверхневі тріщини, які не були виявлені під час неруйнівного контролю. Довжина $2l$ і глибина h напівеліптичної тріщини рівні відповідно 3,2 і 0,8 мм (рис. 4.2) за умови, що довжина тріщини $2l$ в чотири рази перевищує її глибину h .

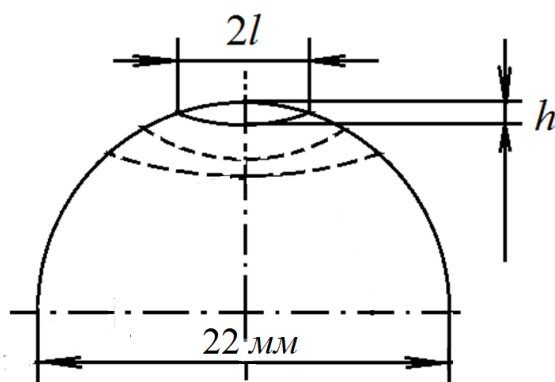


Рисунок 4.2 - Залежність між довжиною $2l$ і глибиною h напівеліптичної тріщини в тілі насосної штанги діаметром 22 мм

Приклад розрахунку залишкового ресурсу насосної штанги без врахування дотичних напружень.

Сумарне максимальне напруження в тілі штанги:

$$\sigma_{max} = \sigma_p + \frac{\sigma_{32}}{2} = 120 + \frac{250}{2} = 265 \text{ МПа}.$$

Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} для матеріалу штанг дорівнює 45 МПа [25]. Переважно $K_{Ic}=40-150$ МПа для матеріалів насосних штанг різних груп міцності.

Визначимо критичну глибину тріщини для даного матеріалу насосної штанги за формулою:

$$h_{кр} = \left(\frac{K_{Ic}}{1,12\sigma_{max}} \right)^2 \frac{1}{\pi} \sqrt{Q} = \left(\frac{K_{Ic}}{1,12\sigma_{max}} \right)^2 \frac{1}{\pi} \sqrt{\left(\frac{3}{8}\pi + \frac{\pi d^2}{8h^2} \right)^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{0,2}} \right)^2} =$$

$$\left(\frac{45 \cdot 10^6}{1,12 \cdot 245 \cdot 10^6} \right)^2 \frac{1}{3,14} \sqrt{\left(\frac{3}{8} \cdot 3,14 + \frac{3,14 \cdot 1,6^2}{8 \cdot 0,8^2} \right)^2 - 0,212 \left(\frac{245 \cdot 10^6}{382 \cdot 10^6} \right)^2} = 0,023 \text{ м}$$

Експерименти показують, що критична глибина тріщини в тілі штанги досягає 5 мм в середовищі пластової води [26].

Швидкість росту тріщини в тілі штанги визначається за допомогою наступних залежностей:

$$V = CK_{max}^m,$$

або,

$$\frac{dh}{dN} = 2,2 \cdot 10^{-12} (K_{max})^{3,45} \text{ мм/цикл},$$

де K_{max} в $\text{даН} \cdot \text{мм}^{-3/2}$ коефіцієнт C зазвичай приймає значення в межах $C=(10^{-16} - 10^{-12}) \text{ мм}^7 \text{ Н}^4$.

Довговічність насосної штанги до критичного розвитку тріщини в її тілі можна визначити методом інтегрування функції швидкості до шляху росту тріщини в межах від $h_{поч}=0,8 \text{ мм}$ до $h_{кр}=23 \text{ мм}$:

$$N_p = \int_{h_{поч}}^{h_{кр}} \frac{dh}{C(K_{max})^m} = \int_{0,8}^{23} \frac{dh}{1,37 \cdot 10^{-12} (K_{max})^{3,45}}, \quad (4.7)$$

K_{max} визначають за формулою:

$$K_{max} = 34,74\sqrt{h} \text{ даН} \cdot \text{мм}^{-3/2}, \quad (4.8)$$

де h - в мм.

Тоді,

$$N_p = \int_{0,8}^{23} \frac{dh}{1,37 \cdot 10^{-12} (34,74\sqrt{h})^{3,45}} = 5,218 \times 10^6.$$

Для переводу одиниць коефіцієнта інтенсивності напружень використовують залежність:

$$1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = 0,3101 \text{ даН} \cdot \text{мм}^{-3/2}.$$

Таким чином, після відпрацьованих $N=5,218$ млн. циклів тріщина глибиною $0,8$ мм розвинеться в тілі штанги і відбудеться злам. Подальша експлуатація штанги не має змісту, оскільки це веде до аварійної ситуації та порушення технологічних параметрів видобування нафти.

Розрахунок критичної довжини тріщини та довговічності насосної штанги за допомогою програми *MathCAD* без врахуванням дотичних напружень.

Вихідні дані:

$$\sigma_v = 588 \text{ МПа} \quad \sigma_{02} = 382 \text{ МПа} \quad \sigma_p = 120 \text{ МПа} \quad \sigma_{zg} = 250 \text{ МПа}$$

$$K_{lc} = 45 \text{ МПа} \quad l = \frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \quad h = 0,8 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_p + \frac{\sigma_{zg}}{2} \quad \sigma_{max} = 2,45 \cdot 10^8$$

$$Q = \left(\frac{3}{8} \cdot \pi + \frac{\pi \cdot l^2}{8 \cdot h^2} \right)^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{02}} \right)^2 = 7,469$$

Критична довжина тріщин:

$$h_{кр} = \left(\frac{K_{lc}}{1,12 \cdot \sigma_{max}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{Q} = 0,023$$

Довговічність штанги до критичного розвитку тріщини, за початковою її глибиною $0,8$ мм:

$$h_i = 0,8 \quad h_{кр} = 23 \quad c = 1,37 \cdot 10^{-12} \quad m = 3,45$$

$$N_p = \int_{h_i}^{h_{кр}} \frac{1}{c \cdot (34,74 \cdot \sqrt{h})^m} \cdot dh = 5,218 \text{ МПа}$$

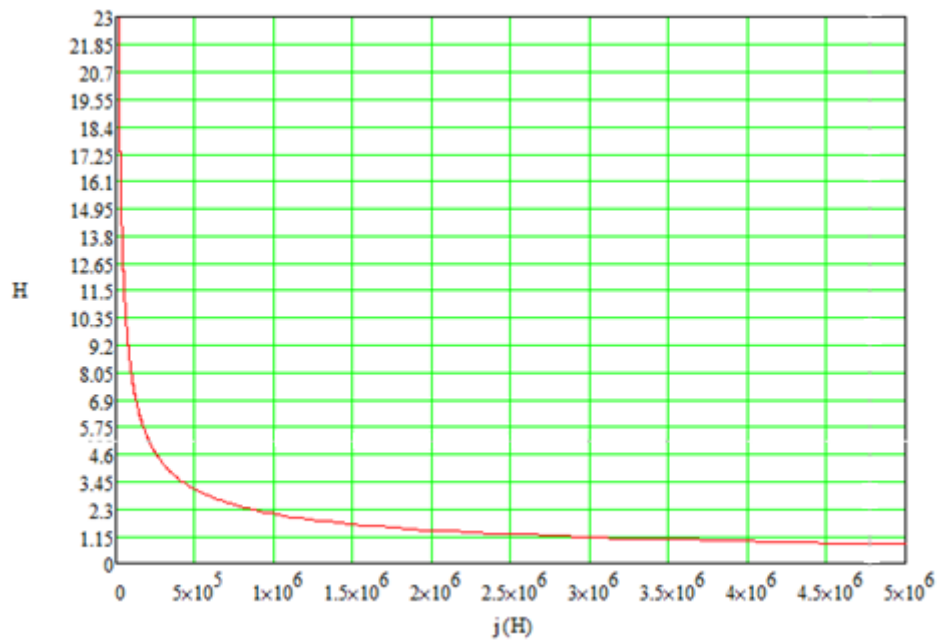


Рисунок 4.3 - Графічна залежність довговічності штанги від глибини тріщини без врахування дотичного напруження

$$H = 0.8, 0.85 \dots h_{кр} \quad j(H) = \frac{1}{c \cdot (34.74 \cdot \sqrt{H})^m}$$

Приклад розрахунку залишкового ресурсу насосної штанги з врахуванням дотичних напружень.

Розрахуємо дотичне напруження за формулою:

де,
$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{\rho}}, \quad (4.9)$$

$$W_{\rho} = \frac{\pi d^3}{16} = 2.091 \times 10^{-6} \text{ м}^3. \quad (4.10)$$

Для $M_{кр} = 250 \text{ Н} \cdot \text{м}$ дотичне напруження:

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{\rho}} = 119,6 \text{ МПа}. \quad (4.11)$$

Обчислимо еквівалентне і допустиме напруження згідно третьої теорії міцності за формулою:

$$\sigma_{екв}^{(III)} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 4 \cdot \tau^2} = 342,4 \text{ МПа}.$$

Визначимо критичну глибину тріщини з врахуванням впливу дотичного напруження:

$$h_{кр} = \left(\frac{K_{Ic}}{1,12\sigma_{екв}^{(III)}} \right)^2 \frac{1}{\pi} \sqrt{Q} = \left(\frac{K_{Ic}}{1,12\sigma_{екв}^{(III)}} \right)^2 \frac{1}{\pi} \sqrt{\left(\frac{3}{8}\pi + \frac{\pi d^2}{8h^2} \right)^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma_{екв}^{(III)}}{\sigma_{0,2}} \right)^2} = 0,012 \text{ м.}$$

Розрахунок критичної довжини тріщини та довговічності насосної штанги за допомогою програми MathCAD з врахуванням дотичних напружень.

Вихідні дані:

$$\sigma_V = 588 \text{ МПа}; \quad \sigma_{02} = 382 \text{ МПа}; \quad \varphi = 62; \quad \delta = 18;$$

$$d = 0.022; \quad M_{kr} = 250; \quad \sigma_{zg} = 250 \text{ МПа}; \quad \sigma_p = 120 \text{ МПа.}$$

$$\text{Сумарне максимальне напруження} \quad - \quad \sigma_{max} = \sigma_p + \frac{\sigma_{zg}}{2} = 2.45 \cdot 10^8;$$

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} = 2.091 \cdot 10^{-6}; \quad \tau = \frac{M_{kr}}{W_p} = 1.196 \cdot 10^8.$$

$$\text{Еквівалентне напруження} \quad - \quad \sigma_e = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 4 \cdot \tau^2} = 3.424 \cdot 10^8;$$

$$K_{Ic} = 45 \text{ МПа} \quad l = \frac{0.0032}{2}; \quad l = 1.6 \cdot 10^{-3}; \quad h = 0.0008;$$

$$Q = \left(\frac{3}{8} \cdot \pi + \frac{\pi \cdot l^2}{8 \cdot h^2} \right)^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{02}} \right)^2 = 7.386;$$

$$h_{кр} = \left(\frac{K_{Ic}}{1.12 \cdot \sigma_e} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{Q} = 0.012.$$

Критична глибина тріщини визначена у метрах.

Довговічність штанги до критичного розвитку тріщини за початкової її глибини 0,8 мм:

$$h_1 = 0.8; \quad c = 1.37 \cdot 10^{-12}; \quad m = 3.45;$$

$$N_p = \int_{h_1}^{h_{кр} \cdot 10^3} \frac{1}{c \cdot (34.74 \cdot \sqrt{h})^m} \cdot dh = 4.912 \text{ МПа};$$

$$H = 0.8, 0.85 h_{кр} \cdot 10^3; \quad j(H) = \frac{1}{c \cdot (34.74 \cdot \sqrt{H})^m} \cdot$$

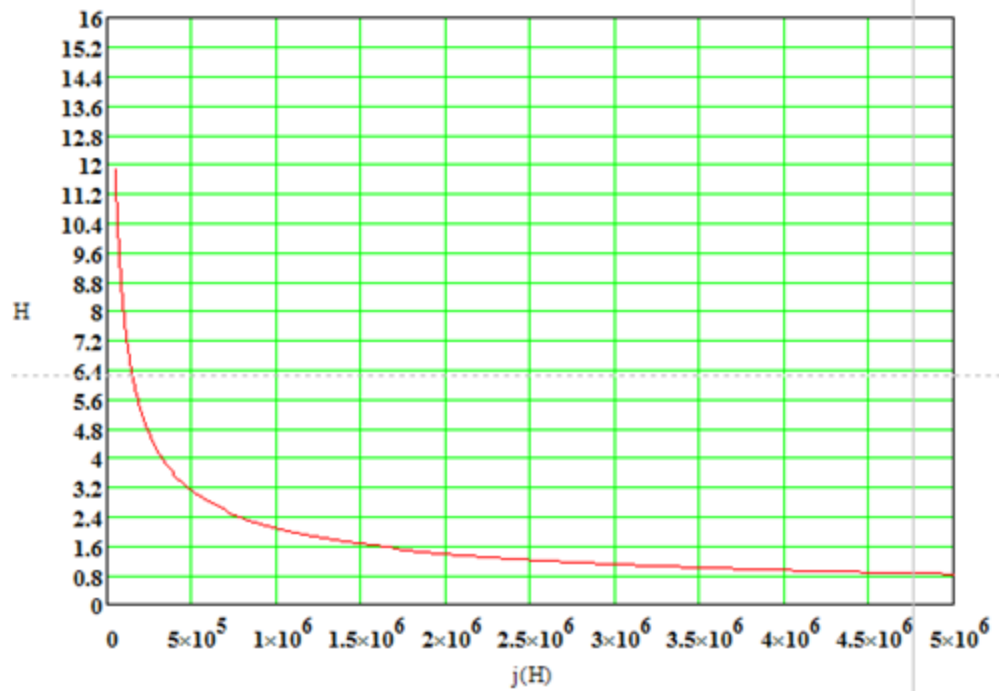


Рисунок 4.4 - Графічна залежність довговічності насосної штанги від глибини тріщини з врахуванням дотичних напружень

Згідно отриманих результатів при врахуванні дотичного напруження критична глибина тріщини зменшується з 23 мм до 12 мм, а довговічність знижується з 5,218 млн. циклів до 4,912 млн. циклів.

Приклад розрахунку залишкового ресурсу насосної штанги з врахуванням дотичних напружень залежно від величини крутного моменту.

Нами проведено розрахунок довговічності насосної штанги при наявності напівеліптичної тріщини для різних значень крутного моменту $M_{кр}$ (від 50 до 250 Н·м) (рис.4.5) [24 – 26; 61].

Розрахунок критичної глибини тріщини та довговічності насосної штанги за допомогою програми MathCAD з врахуванням дотичних напружень.

Вихідні дані:

$$\begin{aligned} \sigma_V &= 588 \text{ МПа}; & \sigma_{02} &= 382 \text{ МПа}; & \varphi &= 62; & \delta &= 18; \\ d &= 0.022; & \sigma_{zg} &= 250 \text{ МПа}; & \sigma_p &= 120 \text{ МПа}; \\ \sigma_{max} &= \sigma_p + \frac{\sigma_{zg}}{2}; & \sigma_{max} &= 2.45 \cdot 10^8; & M_{кр} &= 50,75 \dots 250; \\ W_p &= \frac{\pi \cdot d^3}{16} = 2.091 \cdot 10^{-6}; & \tau(M_{кр}) &= \frac{M_{кр}}{W_p}. \end{aligned}$$

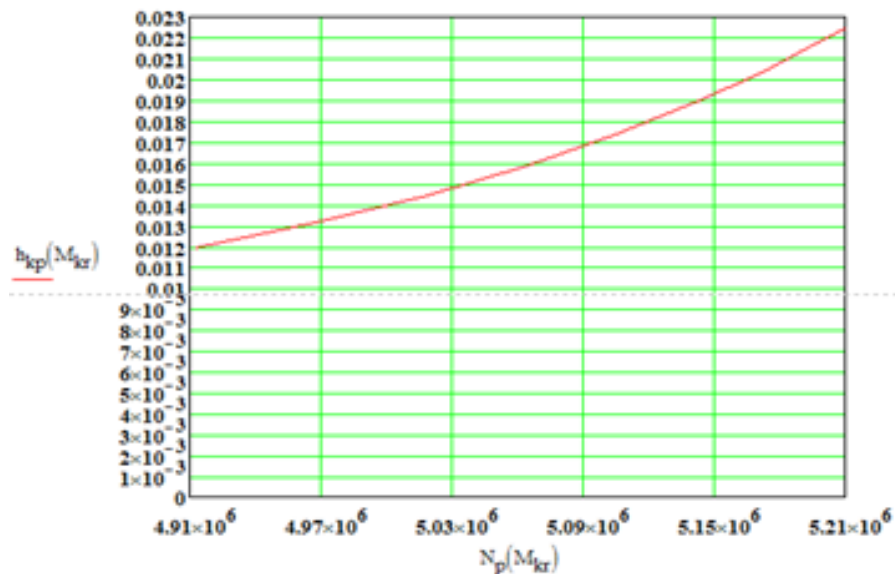


Рисунок 4.5 - Графічна залежність довговічності насосної штанги від критичної глибини тріщини при зміні крутного моменту від 50 до 250 *Нм*

4.2 Оцінка границі втомної міцності насосних штанг при асиметричному навантаженні

Першочерговим завданням, яке потрібно вирішити – це оцінка граничного стану насосних штанг, які схильні до одночасного впливу статичних і циклічних навантажень, та особливо при асиметричному навантаженні. За таких умов працює багато складових машинобудівних конструкцій нафтогазової промисловості. На основі експериментальних діаграм граничних напружень зазвичай здійснюють оцінку граничного стану конструкційних матеріалів. Запропоновано багато аналітичних співвідношень, які описують результати експериментальних досліджень матеріалів при різному співвідношенні статичних і циклічних напружень.

Аналіз експериментальних даних проведених досліджень показує, що форма діаграм граничних напружень в основному залежить від багатьох чинників і змінюється від випуклої до увігнутої. У таких умовах для опису різних форм діаграм граничних напружень жодна з відомих залежностей не може бути універсальною.

Раніше був запропонований інший підхід до вирішення завдання прогнозування і оцінки довговічності та граничного стану при асиметричному багатоциклового навантаженні. Цей підхід добре себе показав при оцінюванні граничного стану композитних і металевих матеріалів при асиметричному розтягу-стиску. У цій роботі даний метод розглядається для оцінки граничного стану конструкційних сталей при асиметричному розтягу-стиску, згині і крученні.

Чим більше значення статичного напруження або величина коефіцієнта асиметрії R в умовах асиметричного розтягу-стиску, тим більше знижується границя витривалості матеріалу. Асиметричний згин призводить до зменшення границі витривалості сталі. В меншій мірі спостерігається суттєве зниження границі витривалості в умовах асиметричного кручення. І лише підвищення статичного напруження призводить до різкого його зменшення при асиметричному крученні. З підвищенням статичної складової перелом кривих втоми відбувається приблизно при одному і тому ж значенні довговічності.

У зв'язку з великим об'ємом втомних випробувань при асиметричному навантаженні для оцінювання його впливу на опір втоми сталі в розрахунках найбільшого поширення набула лінійна залежність Гудмана і параболічна залежність Гербера [10; 110-113]. Однак, в ряді випадків жодна з них не дозволяє описати опір втоми деяких матеріалів конструкцій при асиметричному навантаженні.

У складі змінного навантаження, в процесі випробування, може бути присутнім компонент, який швидко змінюється, також він може змінюватися постійно або повільно. У загальному максимальне і мінімальне напруження в циклі можуть відрізнитися, утворюючи середнє напруження. Воно може бути напруженням розтягу або стиску, в залежності від конкретних умов випробування та особливостей навантаження. Його можна визначити як півсуму максимального і мінімального напружень в циклі:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} . \quad (4.12)$$

Якщо напруження дорівнює 0, то по симетричному циклу здійснюється навантаження.

Додатково для оцінювання умов навантаження використовується поняття коефіцієнта асиметрії циклу навантаження:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.13)$$

Очевидно, що при симетричному циклі $R = -1$; при чисто пульсуючому розтягуванні ($\sigma_{\min} = 0$) $R = 0$. На рисунку 4.6 наведена схема навантаження при асиметричному циклі. Розмах напружень (подвоєна амплітуда) сприяє розвитку деформації зсуву в мікроструктурних елементах (зернах) металу і зародженню мікроскопічних тріщин.

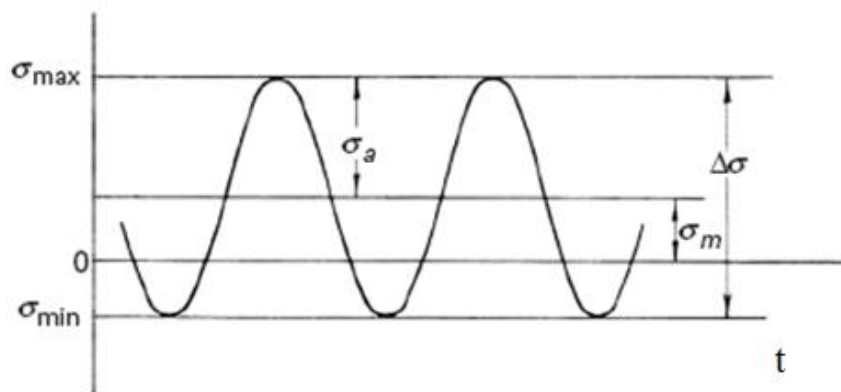


Рисунок 4.6 - Схема навантаження при асиметричному циклі

На розвиток мікротріщин та макротріщин впливає максимальне напруження в циклі навантаження, що збільшується завдяки середньому напруженні розтягу.

В ранніх досліджах сучасниками Велера було виявлено вплив постійного компонента навантаження на опір втоми. Гербером в 1874 році було виведено перше відоме емпіричне співвідношення, що характеризує вплив постійного навантаження на границю втоми,:

$$\sigma_R = \sigma_{-1} \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right), \text{ або } \sigma_a = \sigma_a \Big|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right)^2 \right\} \quad (4.14)$$

де σ_m - середнє напруження циклу навантаження, σ_e чи σ_u - границя втоми.

Це співвідношення має таке припущення, що границя втоми матеріалу зменшується при збільшенні постійної складової навантаження в процесі випробування, незалежно від її знаку.

В кінці XIX століття отримані такі дані, що дозволили точніше уявити роль постійної складової: виявилось, що постійний стиск призводить до збільшення границі втоми. Цей результат відображений в емпіричній формулі Гудмана (1899):

$$\sigma_R = \sigma_{-1} \left(1 - \sigma_m / \sigma_u\right) \text{ або } \sigma_a = \sigma_a \Big|_{\sigma_m=0} \left\{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right\}. \quad (4.15)$$

Формула Гудмана добре характеризує границю втоми алюмінієвих сплавів, але помітно недооцінює опір сталей невисокої і помірної міцності.

С.В. Серенсен у 1975 році було запропоновано співвідношення пов'язане з експериментальними даними для сталей в авіаційній техніці і машинобудуванні:

$$\sigma_R = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m \quad (4.16)$$

де $\psi_\sigma = (2\sigma_{-1} - \sigma_0) / \sigma_0$ - коефіцієнт «чутливості матеріалу до середнього напруження», σ_0 - границя втоми при $R = 0$, тобто при пульсуючому розтягу. Для сталей невисокої міцності: $0.1 \leq \psi_\sigma \leq 0.2$, а для сталей підвищеної міцності: $0.2 \leq \psi_\sigma \leq 0.3$.

Крім цих формул використовуються і інші залежності, які засновані на обробці результатів проведених випробувань. Треба зауважити, що втома конструкцій з концентраторами напружень значно менше залежить від асиметрії навантаження, ніж опір втомі гладких зразків і деталей машин. Це пояснюється тим, що в області підвищених напружень, внаслідок мікропластичної деформації матеріалу під впливом змінного навантаження відбувається поступове зменшення (релаксація) середнього напруження. Тому, наведені вище формули виявляються непридатними для розрахунків втоми «негладких» компонентів конструкцій. Тому в інженерних розрахунках, наприклад, зварних з'єднань,

нехтують впливом середнього напруження на характеристики втоми конструкцій.

Як правило, на вільних поверхнях деталей машини або конструкції починається руйнування від втоми. Компоненти напруженого стану поверхні деталі або конструкції в деяких випадках можуть змінюватися не синфазно та непропорційно параметру навантаження. Для оцінки опору втоми при пропорційній зміні компонентів напруження і складному напруженому стані використовують залежності, що відповідають «теорії міцності». Так як руйнування зароджується на вільній поверхні конструкції, при цьому зазвичай розглядається плоский напружений стан.

Так для руйнування, що розвивається на вільній поверхні, та напруження викликане дією одного циклічного навантаження, згідно «першої теорії» (максимального напруження) максимальне напруження буде рівне:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \sigma_{-1}. \quad (4.17)$$

Максимальне напруження визначає не зародження тріщин, а розвиток тріщин втоми. Значно ближче за механізмом пластичної деформації до умов початку руйнування «третя теорія», подібна до умови Кулона-Тріска для визначення пластичної деформації:

$$(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sigma_{-1}^2. \quad (4.18)$$

У деяких правилах розрахунків використовується залежність Мізеса-Губера для визначення границі втоми при плоскому напруженому стані:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_{-1}^2. \quad (4.19)$$

Емпірична формула Гафа (Gough) часто використовується в розрахунках механізмів і машин де присутня комбінація циклічного кручення і згину:

$$\left(\sigma/\sigma_{-1}\right)^2 + \left(\tau/\tau_{-1}\right)^2 = 1. \quad (4.20)$$

Відомо декілька методів подання залежності границі витривалості, яка залежить від середніх напружень в циклі. Найбільш змістовними при

асиметричному циклі є діаграми граничних амплітуд циклу навантаження, які дають прості уявлення про залежність границі витривалості матеріалу [110-113].

Діаграма граничних амплітуд циклу це залежність амплітуди напруження σ_a від середнього напруження циклу σ_m для певної (заданої) довговічності N . У практиці прийнято використовувати такі форми діаграми граничних амплітуд: пряму Зодерберга, параболу Гербера та пряму Гудмана [10]. У другому випадку значення границі міцності на розрив σ_b та границі витривалості при симетричному навантаженні σ_{-1} поєднані параболічною залежністю. Пряма Гудмана проходить через значення границі міцності на розрив σ_b і границю витривалості при симетричному навантаженні σ_{-1} та є лінійною залежністю.

Пряма Зодерберга на відміну від прямої Гудмана перетинає вісь середніх напружень у значенні границі текучості матеріалу σ_T . Для порівняння властивостей різних матеріалів і аналізу впливу різних чинників на опір втоми при асиметричному навантаженні застосовують діаграми граничних амплітуд у відносних координатах: σ_m / σ_b і σ_a / σ_{-1} .

Співвідношення, запропоновані Smith, Watson, Topper (SWT) або Walker є іншим підходом до опису залежності опору втоми матеріалів від середнього напруження в циклі навантаження.

На основі діаграми Сміта (або схематизованої діаграми Сміта) або діаграми граничних амплітуд Гербера; Гудмана; Зодерберга можна проводити розрахунок граничного стану конструкційних матеріалів, які працюють при асиметричному навантаженні, що формується дією однотипних циклічних і статичних компонентів циклу напружень (рис.4.7) [110-113].

Діаграми будуються на основі лінійної або параболічної залежності. Перша являє собою залежність максимальних (σ_{max}) та мінімальних (σ_{min}) напружень від статичного компоненту σ_m (Рис. 4.7, а). Друга показує залежність амплітуди асиметричного циклу σ_a від статичного компоненту σ_m (Рис. 4.7, б). Для побудови обидвох діаграм використовують дві експериментально визначені характеристики: границю втоми σ_{-1} при симетричному циклі навантаження і границю короткочасної міцності σ_b (або границю текучості σ_T). Побудова таких

діаграм дозволяє без проведення трудомістких і тривалих експериментальних досліджень визначати граничні втомні характеристики (границю втоми) в широкому діапазоні зміни статичного компоненту. Такі діаграми будуються для асиметричного розтягу-стиску, та для асиметричного згину і кручення.

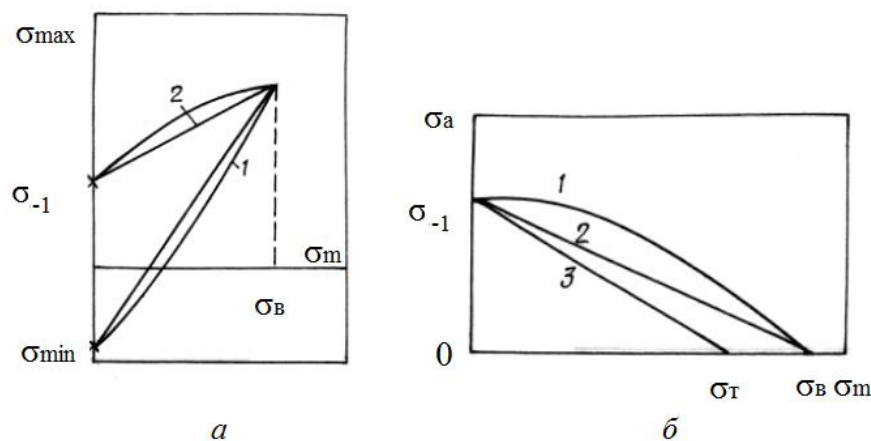


Рисунок 4.7 - Діаграми граничних напружень (а) і граничних амплітуд напружень (б): 1 - парабола Гербера; 2 - видозмінена залежність Гудмана; 3 - залежність Зодерберга

Насосні штанги у реальних умовах з використанням обертачів, піддаються дії різних компонентів циклічної і статичної складових циклу напружень, наприклад, циклічної складової згину і статичної складової розтягу або циклічної складової кручення зі статичним згином, циклічної складової згину і статичного кручення та ін. Перераховані поєднання циклів втомного навантаження називають комбінованим навантаженням. У роботі [111] такий режим, що представляє собою сукупність різнорідних видів навантаження, визначається як неоднорідний. В складових штангової колони має місце подібний характер навантаження. Велике практичне значення має визначення границі втоми конструкційних матеріалів стосовно до таких умов навантаження.

На основі представлених на рисунку 4.7 діаграм може бути здійснена оцінка граничного стану досліджуваного матеріалу, схильного до комбінованого навантаження. Досвід численних досліджень показав, що використання діаграм може призвести до великих похибок, тому що лінійна, параболічна або інші

залежності не завжди відображають реакцію матеріалу на зовнішній силовий вплив. Тому різні технічні характеристики та властивості конструкційних матеріалів призводять до широкого спектру експериментальних граничних діаграм, які описують їх реакцією на комбіноване навантаження.

Було поставлене завдання оцінити допустиму амплітуду напруження, за якої насосна штанга не зруйнується від втоми. Насосну штангу з поперечним перерізом тіла, рівним 20 мм^2 , піддавали дії середнього осьового зусилля розтягу 120 кН . Втомна міцність матеріалу $\sigma_a = \sigma_{-1}$ становить 250 МПа після 10^6 циклів реверсивного навантаження і $\sigma_e = 500 \text{ МПа}$. Використовуючи різні методи, потрібно було оцінити допустиму амплітуду напруження, для яких насосна штанга повинна бути спроектована, щоб витримувати не менше одного мільйона циклів втомного навантаження.

Вирази, за якими можна оцінити вплив середніх напружень, мають наступний вигляд:

$$\sigma_a = \sigma_a \Big|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right\} \text{ - Закон Зодерберга;} \quad (4.21)$$

$$\sigma_a = \sigma_a \Big|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right\} \text{ - Модифікована діаграма Гудмана;} \quad (4.22)$$

$$\sigma_a = \sigma_a \Big|_{\sigma_m=0} \left\{ 1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^2 \right\} \text{ - Діаграма Гербера,} \quad (4.23)$$

де σ_a - амплітудні напруження циклу, σ_m - середні напруження циклу;

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad (4.24)$$

σ_T, σ_B - границя текучості (плинності) та границя міцності матеріалу штанги.

У всіх випадках $\sigma_a = 250 \text{ МПа}$ і $\sigma_m = (120 \text{ кН} / 0,0020 \text{ м}^2) = 60 \text{ МПа}$, величина приведенного напруження $\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_{\max} \sigma_a} = \sqrt{310 \cdot 60} = 136,6 \text{ МПа}$, коли модифіковані критерії Гудмана і Гербера можуть бути застосовані, щоб отримати:

$$\sigma_a = 250 \left\{1 - \frac{60}{500}\right\} = 220 \text{ МПа} \quad - \text{Модифікована діаграма Гудмана};$$

$$\sigma_a = 250 \left\{1 - \left(\frac{60}{500}\right)^2\right\} = 246,4 \text{ МПа} \quad - \text{Діаграма Герберга}.$$

Використання для розрахунку критерію Зодерберга вимагає більше аналізу, так як він включає границю текучості (яку не задано), а не границю міцності при розтягу. Залежно від поведінки матеріалу деталей, границя текучості σ_T може бути такою самою, як границя міцності на розрив σ_e (для дуже крихких матеріалів) або настільки низькою, як $\approx 0,5 \sigma_e$ (для дуже пластичних матеріалів). Вважаємо, що $\sigma_T = 0,7 \sigma_e = 350$ МПа. Таким чином, критерій Зодерберга дає:

$$\sigma_a = 250 \left\{1 - \frac{60}{350}\right\} = 207,1 \text{ МПа} \quad - \text{Закон Зодерберга [10; 24]}.$$

4.3 Технологічні процеси ремонту насосних штанг та прогнозування їх експлуатаційних можливостей

Причиною передчасного порушення стандартних технічних властивостей насосних штанг, є їх руйнування. Дослідження насосних штанг показало, виявлений шар з малим вмістом вуглецю, що призводить до зниження втомної міцності, раковин на поверхні штанги, виявлення виразок, обумовлених нерівномірністю корозійних процесів. Таке руйнування призводить до зниження довговічності штанг, так як втомні тріщини локалізуються в області вогнища корозійного ураження [25; 76].

Для встановлення об'єктивних причин передчасного руйнування насосних штанг в процесі експлуатації, разом з дослідженнями хімічного складу матеріалу та механічними випробуваннями, із статистичним випробуванням промислового матеріалу, проводилися металографічні дослідження зразків насосних штанг зі збереженою поверхнею втомного руйнування. Структура матеріалу насосних штанг зі сталі 20Н2М, 38ХМ, 15Х2НМФ, вивчалася на ділянці втомного руйнування та вздовж тіла штанги із застосуванням методів руйнівного

контролю. При проведенні металографічних досліджень зразків насосної штанги поряд із зоною з малим вмістом вуглецю на поверхні штанги було встановлено, що мікроструктура серцевини штанг зі сталі 20H2M, які пройшли нормалізацію володіє структурою ферито - перлітного типу. Особливістю внутрішньої будови насосних штанг зі сталі 20H2M, які пройшли нормалізацію була неоднорідність структури перерізу на поверхні та на глибині до декількох міліметрів структура мала неорієнтована, а в центрі мала орієнтований характер (уздовж осі насосної штанги). Це пов'язано з виготовленням прокату. Награння після деформації в процесі нормалізації також має безпосередній вплив на неоднорідність структури металу насосної штанги [24;25].

Були проведені мікроскопічні дослідження шліфа виготовленого із штанги, яка була в експлуатації із використанням електронного мікроскопа CarlZeiss, який включає у себе базовий блок EVO 40XVP, що дає можливість роботи у режимах високого вакууму, низького вакууму та наднизького вакууму в комплекті з такими детекторами: вторинних електронів Евернхарта-Торнлі (SE); детектором поглинутого струму; 4-ох сегментним детектором відбитих електронів (BSD) та вторинних електронів для низького вакууму (VPSE); інфрачервоною камерою для спостереження за положенням зразка у камері мікроскопу. Результати електронномікроскопічних досліджень аналізували використовуючи програмне забезпечення SmartSEM.

Згідно результатів мікроскопічних досліджень можна виділити дві основні зони: зону 1 та зону 2. (рис.4.8а). Зона 1 являє собою пластично деформований шар товщиною приблизно 40 – 50 мкм. Зона 2 являє собою основний матеріал, що складається із зерен сорбіту з прошарками фериту, що отримані в результаті проведеної нормалізації штанги. Розміри зерен сорбіту становлять від 10 до 40 мкм. У структурі основного металу міститься значна кількість дефектів. Приблизно 5 % площі шліфа має форму хаотично орієнтованих тріщин та каверн (рис. 4.8, б) [9; 24] .

Розроблений та досліджений спосіб холодної правки заготовки і контролю насосних штанг поздовжнім навантаженням, який забезпечує зменшення

залишкових макронапружень та прямолінійність тіла насосної штанги (рис. 4.9).

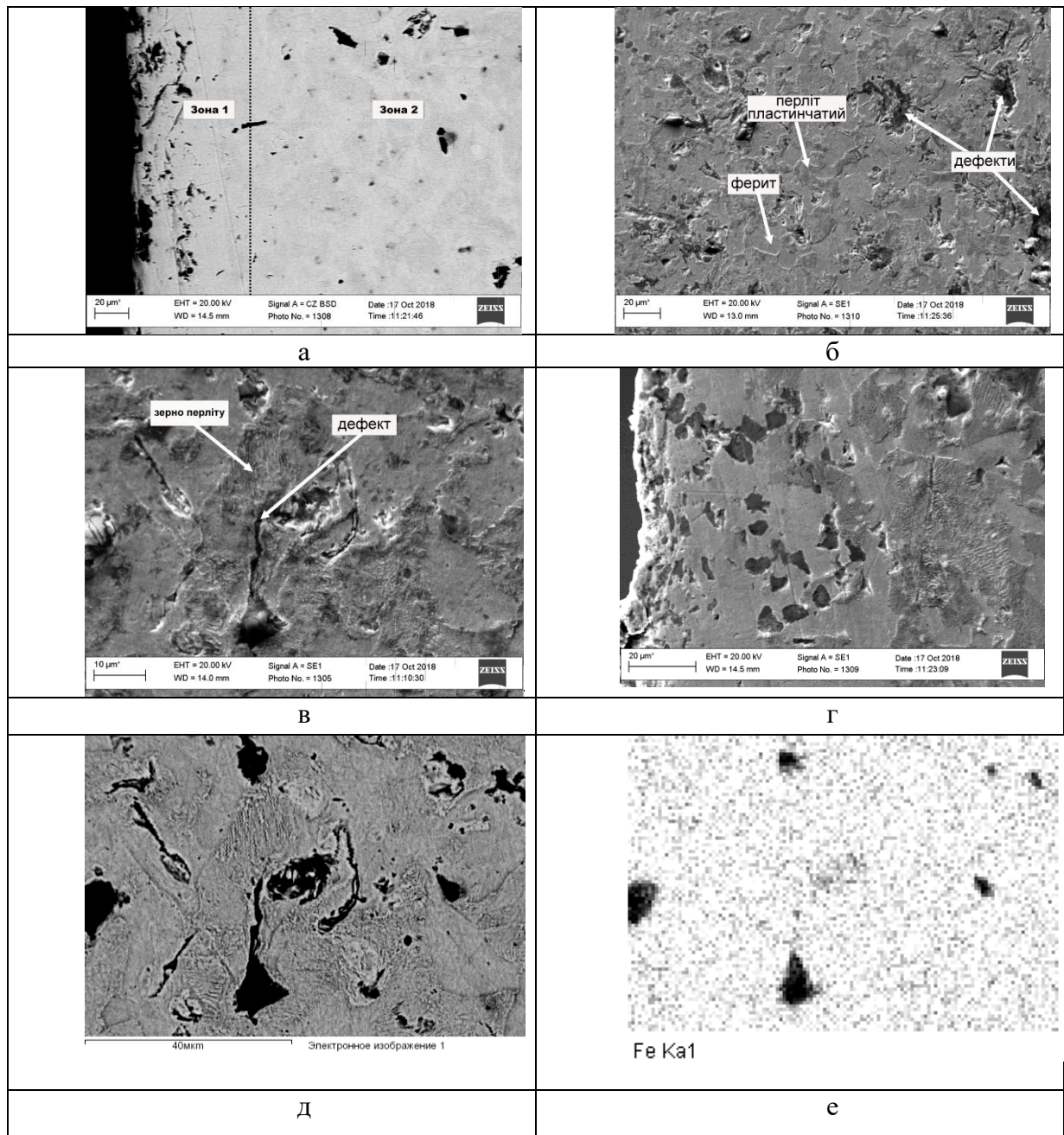


Рисунок 4.8 - Результати мікроскопічних досліджень шліфа відпрацьованої штанги

Холодною правкою та пластичною деформацією тіла насосної штанги з контролем залишкової пластичної деформації забезпечується усунення кривизни тіла танги. В процесі правки насосної штанги поздовжнім розтягом визначають залежність величини границі витривалості від величини пластичного видовження. Контроль величини залишкової пластичної деформації проводять

відповідно до величини необхідного пластичного видовження, яке визначене за найбільшим значенням границі витривалості штанги. При отриманні необхідного пластичного видовження припиняють навантаження насосної штанги і завершують процес правки.



Рисунок 4.9 - Стенд для холодної правки штанги

В процесі ремонту для підвищення втомної міцності насосних штанг можна використати метод зміцнення їх поверхні за допомогою пружної і пластичної деформації за допомогою поздовжнього навантаження розтягу і кручення. Таку операцію виконують в два етапи. На стенді (рис. 4.9) спочатку проводять пластичну деформацію штанги поздовжнім навантаженням, а потім деформацію крученням. Поздовжнє навантаження насосної штанги проводять зі швидкістю 0,12-12,0 мм/с до величини видовження, яке в 1,5 - 5,0 рази перевищує видовження та відповідає границі пропорційності для насосної штанги, яка були в експлуатації. Після чого фіксують значення поздовжнього навантаження і величину пластичного видовження. Через деякий період часу (0,25 - 60,0 секунд) не демонтуючи насосну штангу із стенда проводять деформацію насосної штанги крученням зі швидкістю в діапазоні 0,002 - 1,8 об/с, одночасно контролюючи величину поздовжнього навантаження. При зменшенні

поздовжнього навантаження відносно зафіксованої величини в 1,25 - 4,0 рази завершують деформацію штанги крученням та через 0,25 - 30,0 секунд роблять повне розвантаження штанги. Через 0,25 - 30,0 секунд знімають повністю крутний момент та демонтують насосну штангу із стенда [23; 24].

Встановлено, що при деформації насосної штанги крученням з фіксованою пружно-пластичною деформацією відбувається зменшення напруження у її перерізі, а також зменшується величина деформації через поздовжнє навантаження. В результаті у поверхневому шарі штанги утворюються залишкові напруження стиску, які добре впливають на її втомну міцність, а в осерді насосної штанги виникають залишкові напруження розтягу.

Результати випробувань насосних штанг, зміцнених за даною технологією, показали, що зміцнені штанги мають значно вищу границю втоми в порівнянні зі штангами, які не пройшли зміцнення за даною технологією.

На основі отриманих результатів потрібно вдосконалити метод відновлення технічних характеристик насосних штанг. Це, в свою чергу, дозволить подовжити термін експлуатації насосних штанг та максимального використання ресурсу нафтового прокату, повернення у роботу значної частини відбракованих штанг.

4.4 Висновки до розділу 4

Прогнозувати ресурс насосних штанг як сталевих, так і композитних можна за допомогою розроблених методик і комп'ютерної програми MathCAD, а також можна визначати періодичність проведення їх дефектоскопії. Це дозволить раціонально використовувати насосні штанги, які вже були в експлуатації та значно скоротити аварійні ситуації при видобуванні нафти зі свердловин [24; 25].

Врахування дотичних напружень при розрахунку довговічності насосної штанги є важливим фактором [16; 24].

Отримуємо різні відповіді в залежності від застосованої моделі розрахунку на втомну міцність. Зодерберг є більш консервативним в розрахунках з найменшим опором втомі, в той час як Гербер є менш консервативним з найбільшим опором втомному руйнуванню. Більш високі коефіцієнти запасу міцності для насосних штанг дає можливість використання критерію Зодерберга [10; 24].

Зміцнення поверхні насосної штанги поздовжнім навантаженням і крученням з розробленими режимами забезпечує однорідність деформації по її довжині, внаслідок чого відновлюється первісна геометрія тіла штанги та підвищується втомна міцність матеріалу за рахунок зміцнення її поверхні [11; 21; 24; 25] .

Матеріали, наведені у даному розділі, відображено у таких публікаціях:

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Рачкевич І.О. Розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №3(64) . С.50-56.

3 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Аналіз критеріїв Гудмана, Зодерберга і Гербера та розрахунок втомної міцності насосних штанг. *Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку*: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, 02-03 березня 2017 р. Дрогобич. С. 65-68.

4 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С.135-136.

5 Стефанишин А.Б., Бакун Б.М., Копей Б.В. Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення. *Молодь: наука та інновації*: матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, 15-16 листопада 2018 р. Дніпро, 2018. С. 45-46.

РОЗДІЛ 5

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ НАСОСНИХ ШТАНГ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ

Насосні штанги є важливим елементом в системі приводу штангових насосів, передають зворотно-поступальний рух від нафтових качалок безпосередньо до штангових насосів. Штанги насосні є одним з найбільш вживаних матеріальних ресурсів у нафтовій промисловості. Саме тому збільшення експлуатаційного ресурсу насосних штанг є одним з важливих факторів зниження матеріальних і фінансових витрат при видобутку нафти.

Останнім часом в нафтогазовій промисловості України постійно зростає фонд механізованих свердловин. Більше половини свердловин обладнані штанговими свердловинними насосами, експлуатація яких пов'язана з цілим рядом ускладнень, які часто призводять до аварійних ситуацій з насосними штангами.

Через значну кількість аварійних ситуацій, що припадають на штангові колони, необхідно контролювати стан насосних штанг, особливо в процесі їх ремонту. Це підвищить їх надійність та попередить аварійні ситуації в свердловинах. Забезпечення надійності та довговічності штангової колони - поняття, яке включає технологічні та конструктивні вимоги. Під час експлуатації насосних штанг доводиться стикатися з явищем руйнування їх під дією навколишнього середовища. Великої економічної шкоди завдає корозія та корозійна втома металу. Особливо піддаються корозії та корозійній втомі насосні штанги, які контактують з агресивним середовищем в свердловині (розчини мінералізованої пластової води, кислоти, солі). Переважно собівартість ремонту будь-якого обладнання у багато разів перевищують вартість металу, з якого воно виготовлене [24; 25; 31; 34].

Через дефекти в процесі експлуатації велика кількість насосних штанг вибраковується. Тому необхідно визначити найбільш ефективний технологічний процес ремонту насосних штанг, який був би низький за собівартістю та

забезпечував би надійність та довговічність штанги у процесі подальшої експлуатації. Це, в свою чергу, дозволить повернути значну частину насосних штанг в експлуатацію.

5.1 Вибір та визначення ефективності захисного покриття насосної штанги

Захист від корозії та корозійної втоми - одна з головних проблем у вирішенні цього питання. Під впливом руйнівних впливів і агресивних середовищ металеві конструкції поступово втрачають первинний зовнішній вигляд та свої технічні характеристики. Тому дуже гостро постає питання захисту металу від корозії та корозійної втоми. Корозія негативно впливає на метал, і в більшості випадків він стає непридатним до подальшого використання. Внаслідок корозійної втоми відбувається зародження та ріст тріщин. В кінцевому результаті це призводить до зниження міцності виробу, а також до кінцевого етапу - руйнування. Швидкість таких процесів залежить від умов, в яких вироби виготовляються та експлуатуються. Так як усунути вплив експлуатаційних чинників на будь-які металеві конструкції практично неможливо, то і корозію та корозійну втому слід визнати вічним супутником металу [35; 41].

Пропонується використання під час ремонту штанг технології їх зміцнення шляхом нанесення захисного поліуретанового покриття. Описана технологія дасть можливість збільшити ресурс відремонтованої насосної штанги в процесі подальшої її експлуатації в свердловині[5; 24; 52].

Корозійні та корозійно-втомні процеси обладнання підземної частини штангових насосних установок для видобування нафти є причиною значних витрат коштів і часу на ремонт, заміну обладнання і виконання спуско-підіймальних операцій. Це виникає через високу концентрацію солей та кислих газів у продукції пласта, використанням корозійно-агресивних рідин, що закачуються в свердловину. Тому, важливими проблемами в основному є знос обладнання,

корозія та корозійна втома, парафінізація та відкладення асфальто-смолистих речовин (АСР) на поверхні підземної частини обладнання штангової установки. Вирішення таких проблем дасть змогу зменшити витрати на експлуатацію та ремонт обладнання. Знайомство з сучасною ситуацією на нафтовидобувних промислах України дає підставу стверджувати, що затребуваними на сьогодні методами профілактики та боротьби з корозійним руйнуванням та відкладеннями АПР повинні бути:

- технологічно простими;
- забезпечували би можливість виконуватись в польових умовах без замовлення спецтехніки та передання обладнання в капремонт;
- недорогими.

Найпоширенішим способом у промисловості захисту від зносу, корозії та корозійної втоми є застосування різного роду покриттів. Ізоляція металу методом нанесення на поверхню захисного покриття захищає від корозійного середовища та запобігає утворенню гальванічних процесів на поверхні металу і тим самим захищає від спрацювання та корозії [24; 41; 43; 70].

Поліуретанові антикорозійні покриття мають високу адгезією до металів (сталі, алюмінієвим та магнієвим сплавам, титану, цинку) і до неметалів (склопластику, бетону, дереву). Вони володіють достатньою стійкістю до стирання і зношування, пружністю, стійкі до старіння, також володіють радіаційною стійкістю, стійкістю до дії атмосферних чинників, та агресивних середовищ у вигляді кислот, лугів та розчинників [70].

Велике промислове значення мають поліуретани, як один з нових видів полімерних матеріалів. До поліуретанів відносять також високомолекулярні сполуки, які містять значну кількість уретанових груп, незалежно від будови іншої частини молекул. Такі полімери одержують при взаємодії поліізоціонатів з речовинами, що мають кілька гідроксильних груп [24; 41].

Результати випробувань показали, що покриття на основі пінополіуретанів ППУ- 3Н і ППУ-304Н надійно захищають від корозії вуглецеву сталь (кадмійовану і оцинковану), а також дюралюміній Д-16, але вуглецеву сталь не

забезпечують захистом від корозії (на деяких зразках після 3 місяців випробувань були виявлені сліди корозії). Пінополіуретан ППУ-304Н не забезпечує захист дюралюмініу Д-16. Тому, необхідно розробити спеціальні технології та рецептури пінополіуретанів для захисту від корозії цих металів, до складу яких входять відповідні інгібітори корозії.

Поліуретан може володіти різною твердістю, в тому числі і дуже високою, яка необхідна для багатьох механізмів, але одночасно зберігати еластичність, яка дозволяє твердим частинкам переміщатися по поверхні деталі без подряпин та руйнування. Еластичне покриття в значній мірі нейтралізує вібраційні й ударні коливання, які передаються на підшипники та інші частини обладнання та володіє значною стійкістю до дії кислот, різних розчинників, масел, бензину, озону, інших руйнівних речовин, що дозволяє захистити деталі механізмів, де постійно використовуються подібні речовини.

Поліуретанове покриття відрізняється дуже низьким зношуванням і високим опором до розриву і багаторазових деформацій. Таке покриття продовжує термін експлуатації деталей, а в випадку їх зносу, деталь очищається і можна знову наносити покриття. Пропонується використання комбінованого покриття для захисту насосних штанг від корозії, корозійної втоми, зносостійкості. Перший шар проводимо металізаційним покриттям, другий - склотканиною, а третій - поліуретаном. Таке покриття має добрі фізико-механічні властивості, володіє стійкістю до дії агресивних середовищ, а також має високі антикорозійні властивості [70-72; 95; 96].

Для оцінювання можливості відновлення ресурсу насосних штанг з отриманими експлуатаційними дефектами був проведений експеримент. Серію зразків виготовлених з нових насосних штанг (5шт.) досліджували на опір корозійній втомі. При дії змінних напружень різної величини в їх тілі вирощували тріщини, що відповідали величині можливих експлуатаційних навантажень.

Для контролю пошкоджень зразків насосних штанг використовували магнітопорошковий метод.

Для виявлення поверхневих дефектів (тріщин) було представлено три зразки насосних штанг, що склалися з головки штанги і частини тіла. Зразки на квадратних шийках були ідентифіковані нанесенням позначення на двох зразках штанги - «1» і «2», та без позначення третій. Матеріал зразків штанг – вуглецева та низьколегована сталь 20Н2М після термічної обробки, яка була виготовлена згідно ГОСТ 13877-96. За магнітними характеристиками дану сталь відносять до магнітожорстких матеріалів.

Для намагнічування зразків використовували магнітний дефектоскоп ПМД-70 (рис.5.1) (блок управління №396 та блок імпульсний №378 по ТУ25-06.1604-79) для формування намагнічуючого струму з пристроями для намагнічування постійним магнітним полем. В комплект дефектоскопа входить: соленоїд (рис.5.1) – для намагнічування вздовж осі насосної штанги та приставний електромагніт (рис.5.2) для намагнічування поперек осі штанги.



Рисунок 5.1 – Магнітний дефектоскоп ПМД-70



Рисунок 5.2 - Приставний електромагніт

Рідкий магнітний аерозоль (магнітна суспензія чорного порошку) MR 76 S фірми MR® Chemie GmbH (Німеччина) використовували для визначення місця розташування дефектів, їх форми та протяжності на поверхні штанги. Для огляду та аналізу виявлених дефектів застосовували оглядову лупу ЛПК-471 (2^X).

Контроль проводили у відповідності до:

ГОСТ 21105 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод»;

ISO 6933;

PrEN 13262;

DIN EN ISO – 9934 – 1, 2, 3;

AAR M 107.

У даних умовах проведення контролю забезпечувалась умовна чутливість магнітопорошкового контролю "В" згідно ГОСТ 21105. Це забезпечує виявлення поверхневих дефектів мінімальної довжини 2 мм та шириною розкриття не менше 25 мкм.

Технологічний процес контролю зразків насосних штанг включав наступний перелік операцій:

1 Підготовка поверхні зразка до проведення контролю. За допомогою металевих щіток вручну з незначними натискними зусиллями і мийних засобів було очищено поверхні зразка штанги (тіло та піделеваторний борт) від пилу, продуктів корозії і інших забруднень. Оскільки поверхня зразка, яка контролюється має темну поверхню і контроль проводився з використанням чорного магнітного порошку, то на очищену та знежирену поверхню було нанесено аерозольною білою фарбою-контрастом MR 72 фірми MR® Chemie GmbH (Німеччина) фонове покриття завтовшки до 20 мкм, що забезпечило необхідний контраст дефектів на фоні темної поверхні зразків.

2 Перевірка працездатності дефектоскопа (підключення та налаштування) проводили згідно інструкції з експлуатації дефектоскопа. Перевірку

працездатності дефектоскопу здійснили за допомогою стандартного зразка РСО-МД-15-09 згідно ГОСТ 21105-87.

3 Для виявлення поперечних та поздовжніх тріщиноподібних дефектів поверхні зразка використовували для намагнічування полюсне поздовжнє (соленоїдом) та поперечне (приставним електромагнітом) намагнічування, яке відбувалося відносно осі штанг. Враховуючи особливості матеріалу насосних штанг, контроль проводився за залишковою намагніченістю. Струм намагнічування – постійний, величиною 15 А – при намагнічуванні приставним електромагнітом та 45 А – при намагнічуванні соленоїдом.

4 Рідкий магнітний аерозоль наносився після намагнічування із аерозольного балона ємкістю 500 мл. Це так званий мокрий спосіб нанесення індикаторного порошку.

5 Візуальний огляд поверхонь проводився після повного стікання залишків аерозолу з поверхні зразків за допомогою оглядової лупи двократного збільшення. Огляд поверхні проводився при комбінованому освітленні яскравістю не менше 1000 лк.

6 Тріщиноподібні дефекти виявлені в ході контролю поверхні фіксувалися на цифрову фотокамеру і зберігалися в ПК для подальшого їх вивчення. Результати контролю зразка насосної штанги представлені на рисунку 5.3.

Випробовування зразків штанг проводили на машині ЗКШ-25, призначеної для проведення втомних випробувань, на протязі часу, який складає не менше 50...75% довговічності насосних штанг з початку навантаження до повного їх руйнування. На рис. 5.4 приведені криві втоми насосних штанг до повного їх руйнування (крива 1) і з вирощеними в тілі тріщинами до 50...75% ресурсу (крива 2). Зразки демонтували з машини, проводили візуальний огляд та дефектоскопію і наносили поліуретанове покриття на їх поверхню.

Наступні випробування зразків з поліуретановим покриттям проводили при більш високих напруженнях (на 25% вище попередніх). Отримані результати показали значне підвищення їх ресурсу в порівнянні з не покритими поліуретаном зразками (крива 4 на рис. 5.4). Границя обмеженої витривалості

таких зразків штанг збільшилася в 1,5...2,0 рази при низьких рівнях напружень (70-150) МПа та в 4...10 разів при високих рівнях напружень (150-250) МПа. При дії змінних напружень приблизно 250 МПа ресурс відновлених поліуретановим покриттям насосних штанг досягає ресурсу нових насосних штанг і навіть може бути більшим (крива 3 на рис. 5.4).

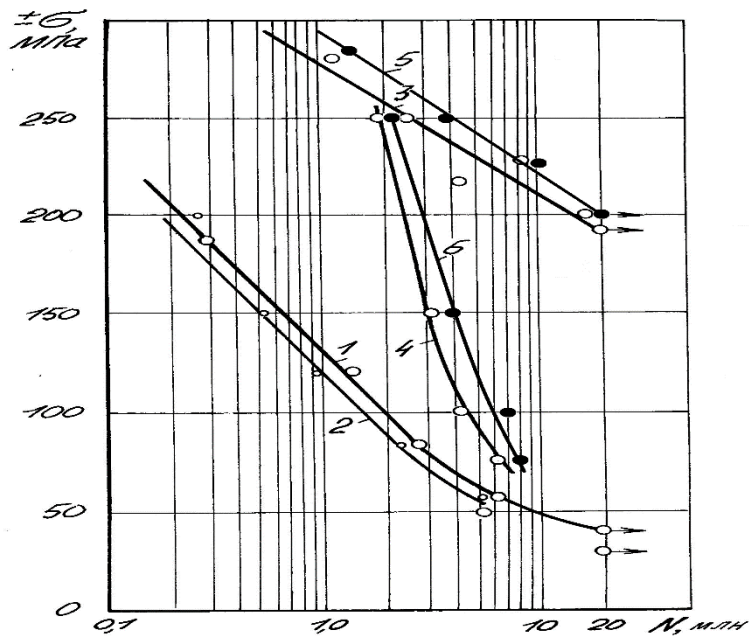


Рисунок 5.3 – Тріщини втоми, які утворилися в тілі насосної штанг після випробувань при змінному напруженні $\sigma=140$ МПа

На основі проведених випробувань можна стверджувати, що відновлення насосних штанг з експлуатаційними дефектами за допомогою поліуретанового покриття значно гальмує ріст тріщин та подовжує ресурс штанги. Ефективність ремонту насосної штанги з дефектами визначали за формулою:

$$k = N_p/N, \quad (5.1)$$

де N_p - довговічність штанг після ремонту, які мають дефекти (втомні тріщини); N - довговічність нових насосних штанг.



1 – до повного руйнування, 2 – з вирощеними в тілі дефектами до 75-90% повного ресурсу, 3,5 – нові штанги, та 3 поліуретанове покриття в повітрі, 4 – з тріщинами, відновленими поліуретановим покриттям та металізаційне цинкування, 6- запропонованим методом

Рисунок 5.4 – Криві втоми (3,5) та корозійної втоми насосних штанг діаметром 22 мм з сталі 20Н2М серійних (1,2) та з поліуретановим покриттям (5,6)

Пропонується відновлення технічних характеристик насосних штанг і збільшення обсягів їх ремонту після тривалої експлуатації у свердловині. Таке завдання можливо вирішити методом знімання верхнього шару металу шляхом проточування. Таким методом проводиться ліквідація з поверхні штанги всіх коротких тріщин, що утворилися в процесі експлуатації. Відомо, що короткі тріщини на поверхні практично не впливають на границю втоми сталі. Дефекти, які можуть бути небезпечні з точки зору втомної міцності добре описує діаграма Кітагави (рис. 5.5) [98].

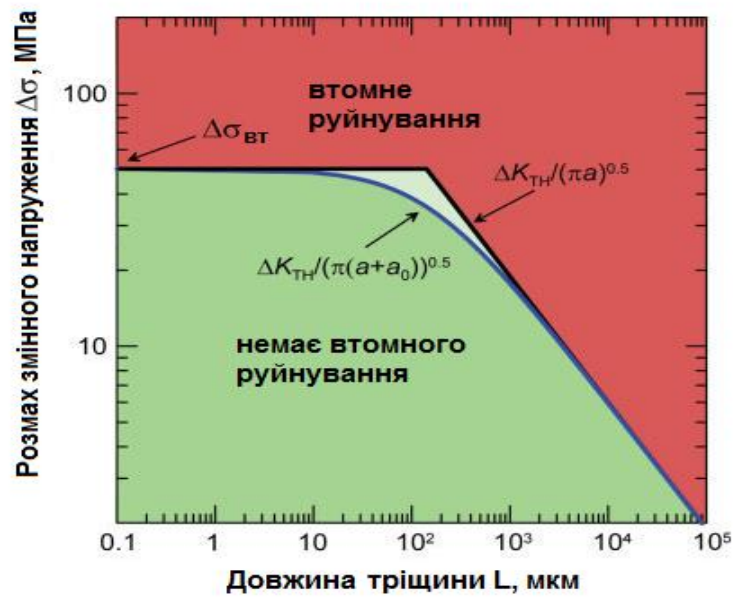


Рисунок 5.5 – Діаграма Кітагави для сталі при циклічному навантаженні до $N=10^6$ циклів пороговим розмахом коефіцієнта ΔK_{th} (межа втоми – $\Delta\sigma_{вт}$)

Експериментально доведено [2], що відновленню підлягають насосні штанги, з корозійно-втомними тріщинами глибиною до 2-3 мм, максимум до 4 мм, коли величина ефективності $k > 1$ (рис.5.6).

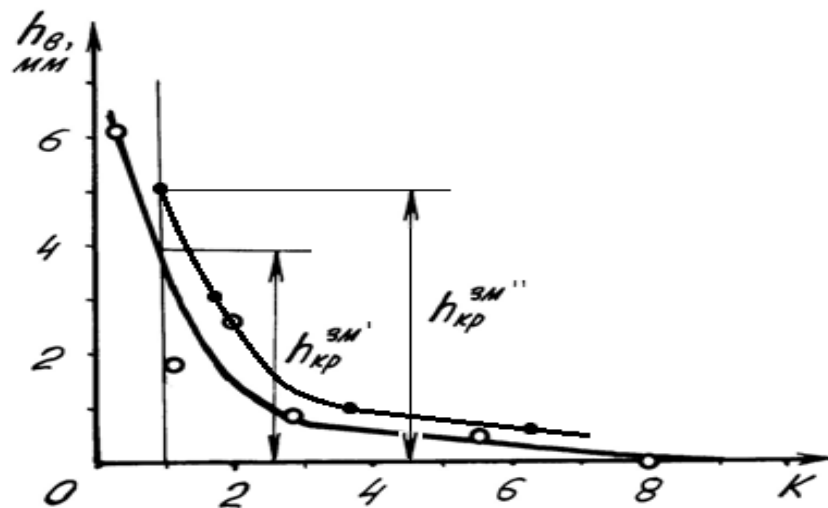


Рисунок 5.6 – Залежність ефективності ремонту k насосних штанг комбінованим методом від глибини корозійно-втомної тріщини h_v , та нанесенням поліуретанового покриття

Недопустимо відновлення комплексним методом насосних штанг з дефектами глибиною $h_g > 4$ мм. Наприклад, при $h_g = 6,2$ мм ефективність ремонту різко знижується та її значення складає величину менше 1 ($k = 0,84$), тобто ресурс зміцнених насосних штанг з дефектом вказаної глибини менше ресурсу серійних насосних штанг при нанесенні поліуретанового покриття допустимо відновлених.

Критичні розміри дефектів у даному випадку близькі до запропонованих раніше [25] і можуть бути критеріями насосних штанг з дефектами до глибини 5 мм, відбракування при ремонті, які були в експлуатації.

На основі проведених досліджень запропоновано рівняння експоненційної регресії, яке дає можливість визначити ефективність ремонту k в залежності від глибини втомної тріщини покритої поліуретаном:

$$k=5,65e^{-0,49h_g} \quad (5.2)$$

Насосні штанги, які проробили певний час у свердловині, також можна відновити їх технічні характеристики шляхом нанесення полімерних покриттів чи металополімерів. В таблиці 5.1 приведені результати лабораторних випробувань насосних штанг, які відпрацювали в свердловинах.

Таблиця 5.1 - Довговічність відпрацьованих у свердловині насосних штанг після відновлення методом нанесення полімерного поліуретанового покриття

Діа метр штанг d,мм	Довговічність в стендових умовах N, млн циклів/величина змінного напруження, МПа	
	Без покриття	З покриттям
22	0,538/+140	>20/+140
	2,938/+140	>50/+140
25	4,00/+100	>28/+200
	13,52/+80	>20/+250

На підставі отриманих результатів випробувань нових насосних штанг і тих які були в експлуатації можна зробити висновок, що нанесення поліуретанового покриття на поверхню насосної штанги збільшує їх довговічність в декілька

разів. Таким чином, нанесене поліуретанове покриття на поверхню нових і насосних штанг, які були в експлуатації, дозволяє збільшити довговічність нових і подовжити термін експлуатації штанг, які працювали певний час в агресивному середовищі у свердловині. Це дозволить скоротити витрату насосних штанг, які вводяться в експлуатацію.

5.2 Переробка відпрацьованих насосних штанг під їх виготовлення

Продовження терміну служби насосних штанг є одним із актуальних завдань у нафтовому виробництві. При експлуатації насосні штанги набувають дефекти, такі як тріщини по тілу штанги, місцеві стоншення галтельних частин, корозійні поразки і ін. Даним способом можливо організувати виробництво штанг діаметром 19-12 мм, використовуючи в якості вихідного матеріалу (заготовки) насосні штанги, не придатні для ремонту за будь-якою відомою технологією.

Запропонований спосіб відновлення насосних штанг включає очищення поверхні від відкладень парафіну, солі і асфальтенів, візуальний і інструментальний контроль, обрізку головок насосних штанг, механічну обробку тіла штанги, висадку нових головок, термічну обробку, гарячу правку, холодну правку тіла насосної штанги, механічну обробку головок штанг [24].

На ремонт відпрацьованих насосних штанг в умовах ТОВ «Такт» були направлені відпрацьовані штанги діаметром 25 мм, 22 мм. Розроблена технологія отримання заготовок із відпрацьованих насосних штанг, яка включає наступні операції:

1. Вхідний контроль відпрацьованих насосних штанг, які надійшли в ремонт, по твердості, який включає в себе - заміри твердості за Бринелем НВ і сортування відпрацьованих НШ з $HV \leq 240$ і з $HV \geq 240$.

2. Сортування насосних штанг за овальністю (механічному стиранню) в одному перерізі.

3. Відрізання висаджених головок, без залишку галтелі, на заготовці до номінального діаметра. Косина різку не більше 0,5 мм.

4. Механічна очистка відпрацьованих насосних штанг на лінії дробоструминного очищення гарячекатаного прокату в 3-5 проходів до повного очищення поверхні прутків.

5. Зняття фасок $3 \times 30^\circ$ з обох кінців заготовки на фаскознімальній машині;

6. Виправлення заготовок на 2-х валковій косовалковій правильній машині. Кривизна прутків після правки не більше 1 мм / 1 м.

7. Обточування на безцентровому токарному верстаті відпрацьованих насосних штанг діаметром 25 мм до 22,06 - 22,03 мм, відповідно до ГОСТ 13877-96. На обточеній поверхні не допускаються дефекти - тріщини, закати, підрізи і інші дефекти механічного характеру, які виводять пруток за мінімальний діаметр. У разі виявлення вищезазначених дефектів на поверхні обточених прутків діаметром 22,06-22,03 мм проводиться їх обточування до діаметру 19,02-19,05 мм, а у разі виявлення вищевказаних дефектів на поверхні обточених прутків діаметром 19,02-19,05 мм проводиться їх обточування до діаметру 16,02-16,05 мм. Чистота поверхні після проточування складає Ra 0,63. Найбільш небезпечними є втомні тріщини, а також тріщини в результаті тривалого впливу циклічних знакозмінних навантажень, що можуть привести до серйозних поломок. Тому пропонується спосіб передбачає механічну обробку тіла штанги зрізанням її поверхневого пошкодженого шару металу. При цьому тілу насосної штанги з неприпустимими дефектами надають правильну геометричну форму.

8. Проведення поверхневого наклепу заготовки. Для підвищення втомної міцності та інших механічних характеристик після проточування провести поверхневе пластичне деформування роликом (кулькою). Такий процес зміцнення дає можливість значного підвищення експлуатаційних властивостей насосної штанги і разом з тим є простим у виконанні та маловартісним. Одночасно покращується твердість, зносостійкість, шорсткість поверхні.

9. Сортування готової продукції за діаметрами і поверхнею на відповідність ГОСТ 13877-96.9. Промаслення заготовки насосної штанги інгібітором атмосферної корозії.

10. Видача сертифіката якості на вироблену заготовку насосної штанги.

Отримані заготовки в умовах ТОВ «Такт» були направлені на Бориславську базу виробничого обслуговування для виготовлення насосної штанги відповідних діаметрів.

Виготовлення штанги проводили за технологією, яка включає наступні операції:

1. Висадка головок насосної штанги. Проводили висадку нових головок насосної штанги на горизонтально-кованій машині за відомою технологією.

2. Термічна обробка та гаряча правка насосної штанги. Наступна операція запропонованого способу передбачає термічну обробку металу штанг, нормалізацію, тобто нагрівання до температури 920-950 °С і охолодження на повітрі. Проведена термічна обробка покращує механічні характеристики матеріалу насосних штанг, внаслідок чого зменшуються залишкові напруження в металі і покращуються пластичні властивості - відносне подовження і ударна в'язкість. В результаті знижується крихкість металу насосної штанги, що покращує в деякій мірі їх властивості. Тіло насосної штанги після термічної обробки в нагрітому стані вирівнюють методом розтягування, тобто проводять гарячу правку насосної штанги. Найбільше зусилля правки – 250 кН.

3. Проведення холодної правки насосної штанги після повного її охолодження. Для забезпечення прямолінійності тіла насосної штанги та зменшення залишкових макронапружень розроблений та досліджений метод холодної правки. За допомогою пружної і пластичної деформації насосних штанг і контролем залишкової пластичної деформації усувається місцева кривизни її тіла. Для забезпечення втомної міцності насосних штанг використовується метод зміцнення, який реалізовується через пружну і пластичну деформацію виробу під дією поздовжнього навантаження розтягу і кручення. Важливим є те, що після пластичної деформації штанги поздовжнім навантаженням проводять деформацію тіла штанги крученням, при цьому поздовжнє навантаження ведуть зі швидкістю в інтервалі 0,12-12,0 мм/с до величини значення видовження, яке в 1,5-5,0 рази перевищує видовження, що відповідає границі пропорційності для насосної штанги, яка була в експлуатації.

Одночасно фіксують величину поздовжнього навантаження і величину пластичного видовження штанги, і через 0,25-60,0 секунд здійснюють деформацію тіла штанги крученням зі швидкістю в інтервалі 0,002-1,8 об/с контролюючи величину поздовжнього навантаження. При зменшенні цього навантаження відносно зафіксованої величини в 1,25-4,0 рази завершують деформацію крученням та через 0,25-30,0 секунд роблять повне розвантаження насосної штанги від дії поздовжнього навантаження. Через 0,25-30,0 секунд крутний момент повністю знімають.

4. Механічна обробка головок штанг.

5. Кінцевою операцією є промаслення виробу інгібітором атмосферної корозії.

У запропонованому способі вирішується завдання ремонту штанги і максимального використання ресурсу нафтового прокату, повернення в роботу значної частини відбракованих штанг. Також вирішується завдання відновлення технічних характеристик насосної штанги, тобто усунення пошкоджень, які виникають на поверхні штанги в процесі експлуатації (тріщини, потертості, нерівномірне зношування штанги по діаметрі, пошкодження внаслідок корозійного пошкодження), а також зміцнення штанги поверхневим наклепом.

5.3 Експериментальні дослідження зразків насосних штанг на опір втомі

Для дослідження втомної міцності з фірми «ТАКТ» надійшли зразки в кількості 18 штук довжиною 320 мм, різних марок сталей та різних діаметрів (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 - Типи зразків насосних штанг

Умовне позначення зразка	Марка сталі	Діаметр штанги, мм	Термічна обробка (нормалізація) °С	Кількість, шт
№1	38ХГМ/38ХГМА	22	Не піддавалися термообробці	2
№2	38ХГМ/38ХГМА	22	870	2
№3	20Н2М/20Н2МА	22	Не піддавалися термообробці	2
№9	38ХГМ/38ХГМА	19	870	2
№10	20Н2М/20Н2МА	19	860	2
№13	38ХГМ/38ХГМА	19	870	2
№17	30ХМ/30ХМА	19	875	2
№19	35Г2/40Г2	19	840	2
№20	35Г2/40Г2	19	Не піддавалися термообробці	2

Випробування пройшли 14 зразків ремонтіваних насосних штанг. Для металографічних досліджень було використано 4 зразки. Як робоче середовище використовували пластову воду забрану зі свердловини НГВУ «Долина нафтогаз» (мінералізація 106596 мг/л, рН 7,08; аніони (в мг/л) – 63968 Cl^{-1} , 207 SO_4^{-2} , 293 HCO_3^{-1} , решта - CO_3^{-2} ; катіони (в мг/л) – 37512 ($\text{K}^{+} + \text{Na}^{+1}$, 4008 Ca^{+2} , 608 Mg^{+2} , 50 Fe) та нафту з 10% розчином соляної кислоти).

При різному навантаженні та напруженнях згину випробували зразки на установці ЗКШ-25 з обертанням частотою 950 хв^{-1} . Принципова схема установки приведена на рис.5.7.

Установка встановлена на рамі 1. В опорах 2 розміщено вал 3, який через перехідну муфту 4 з'єднується з електродвигуном 5. Електродвигун обладнаний лічильником обертів 6. Зразок насосної штанги 7 через муфту 8 з'єднується з валом 3. За допомогою осі вантажу 9 і підшипника 11 зразок навантажується вантажем 10. В камері 12 знаходиться робоче середовище. Подушки 13 призначені для зменшення вібрації. Електродвигун 5 автоматично вимикається за допомогою вимикача в момент руйнування зразка.

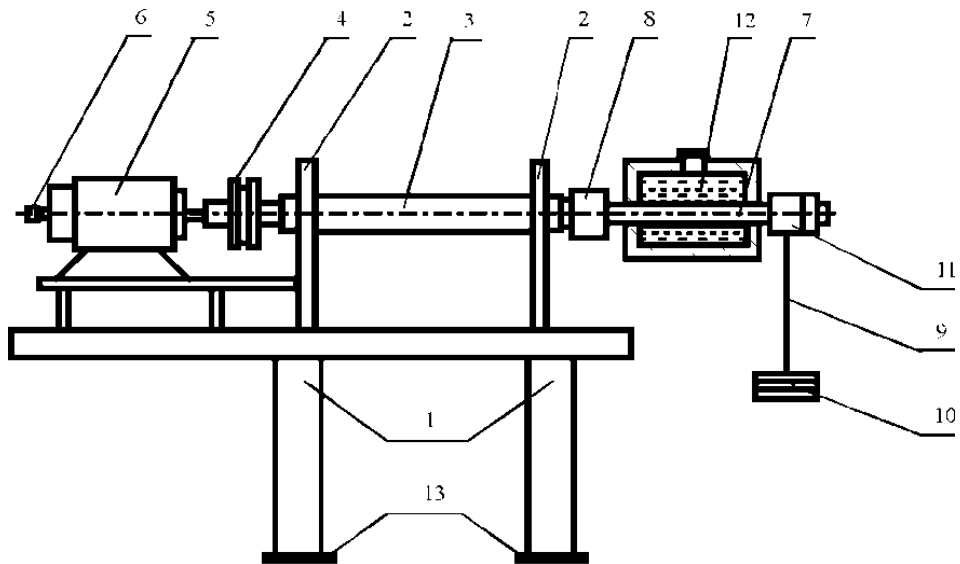


Рисунок 5.7 - Схема установки для втомних випробувань насосних штанг при циклічному згині

Установка призначена для проведення випробувань на корозійну втому насосних штанг діаметром 16, 19, 22, 25 мм при частоті навантаження 15,2 Гц [25].

При проведенні ультразвукового контролю машину ЗКШ-25 зупиняли, знімали камеру 12 і через 20-30 хвилин запускали знову. Контроль проводили декілька раз на добу. Схема контролю наведена на рис.5.8.

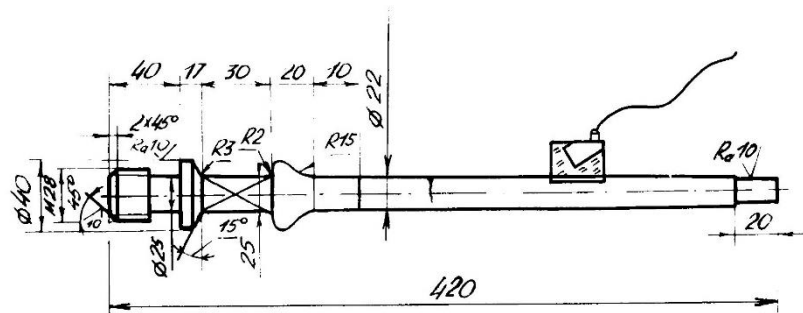


Рисунок 5.8 – Конструкція зразка та схема ультразвукового контролю дефекту в штанзі

Повне випробування пройшло вісім відновлених зразків. Для проведення експериментальних досліджень було проведено розрахунок ваги вантажу при заданому напруженні згину. Отримані дані зведені в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 - Результати випробувань відновлених зразків

Умовне познач. зразка	Марка сталі	Діаметр штанг, мм	Напруження згину, МПа	Вага вантажу, Н	Кількість відпрацьованих циклів, млн.	Примітка
№2	38ХГМ/38ХГМА	22	140	350	10,165	Зразок не зламався
№2а	38ХГМ/38ХГМА	22	200	500	8,57	Зразок не зламався
№10	20Н2М/20Н2МА	19	200	200	5,63	Зразок зламався
№10а	20Н2М/20Н2МА	19	250	250	4,85	Зразок зламався
№13	38ХГМ/38ХГМА	19	180	180	10,0	Зразок не зламався
№13а	38ХГМ/38ХГМА	19	300	300	7,13	Зразок не зламався
№9	38ХГМ/38ХГМА	19	200	200	5,5	Зразок зламався
№9а	38ХГМ/38ХГМА	19	300	300	4,33	Зразок зламався

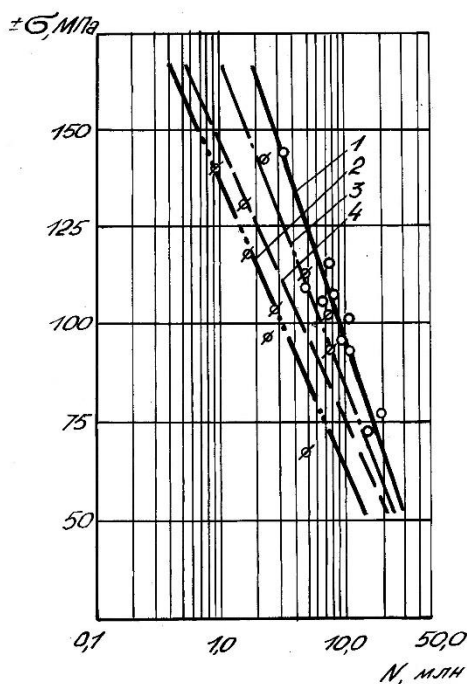
Шість зразків, що не піддавалися термічній обробці (нормалізації) були зруйновані ще на початковій стадії випробування в місці термічного впливу при висадці головки насосної штанги. Тому, пропонується в обов'язковому порядку проводити нормалізацію ремонтних насосних штанг для зняття залишкових напружень та утворення структури ферито-перліту.

При напруженнях згину 200 МПа зразок №2 пройшов понад 10 млн. циклів і не зламався. Такі результати свідчать про те, що насосні штанги діаметром 22 мм виготовлені із сталі 38ХГМ/38ХГМА можуть витримувати напруження згину величиною до 200 МПа.

При напруженнях згину 200 МПа зразок №10 пройшов 5,63млн. циклів і зламався в місці, що знаходиться приблизно 50 мм від галтелі головки насосної штанги. Такі результати свідчать про те, що насосні штанги діаметром 19 мм виготовлені із сталі 20Н2М/20Н2МА теж в змозі витримувати високі напруження згину.

Криві корозійної втоми насосних штанг діаметром 19 мм і 22 мм зі сталі 20Н2М бездефектні і з технологічними дефектами, з експлуатаційними

дефектами (втомні тріщини, корозійні пошкодження, виразки тощо) показані на рис.5.9. Умовна межа корозійної втоми штанг бездефектних і з технологічними дефектами діаметром 19 мм складає 95 МПа, а діаметром 22 мм – 85 МПа. Умовна межа корозійної втоми штанг з експлуатаційними дефектами діаметром 19 мм складає 75 МПа, а діаметром 22 мм – 65 МПа.



1,3 – бездефектні і з технологічними дефектами; 2,4 – з експлуатаційними дефектами (втомні тріщини, корозійні пошкодження, виразки тощо)

Рисунок 5.9 – Криві корозійної втоми насосних штанг діаметром 19 мм (1,2) і 22 мм (3,4) зі сталі 20Н2М

Якщо обробка дробом чи обробка металевими обертовими щітками підвищує опір втомі насосних штанг з сталі 20Н2М в 3-4 рази, то суміщення поверхневої пластичної деформації (ППД) і металізаційного цинкування піднімає обмежену границю витривалості в 4-5 раз (рис. 5.10).

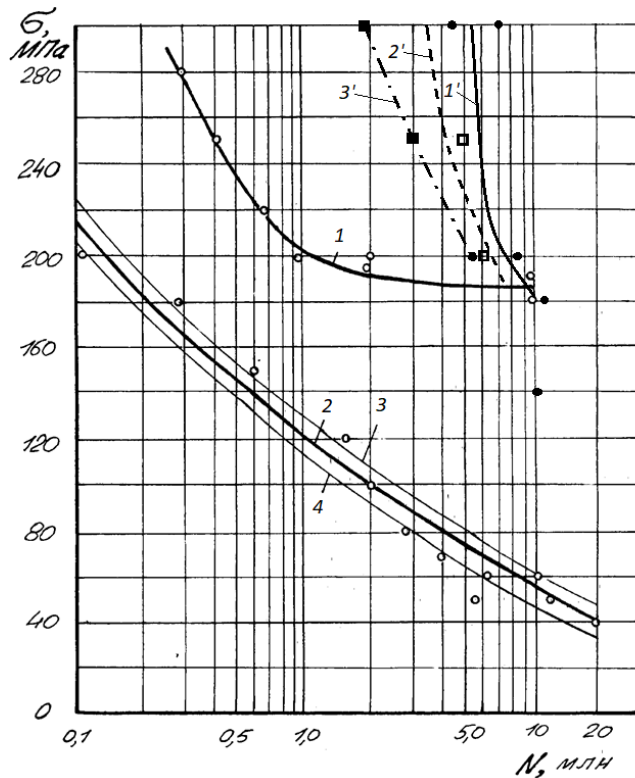


Рисунок 5.10 – Крива втоми (1) і корозійної втоми (2) насосних штанг з сталі 20Н2М та діаметром 22 мм з кривими інтервалів довіри для опору корозійній втомі середнього значення границі (криві 3 і 4), криві (1' – 38ХГМ), (2' – 20Н2М), (3' – 30Г2) штанг діаметром 19 мм корозійної витривалості після ремонту

Результати експериментів свідчать, що запропонований метод відновлення штанг забезпечує зростання обмеженої границі витривалості зразків згідно запропонованої технології відновлення штанг в 3-4 рази. Також встановлено, що при деформації насосної штанги крученням одночасно з пружно-пластичною деформацією відбувається зменшення напруження у перерізі тіла штанги. Також зменшується і величина деформації поздовжнього навантаження. В результаті в поверхневому шарі насосної штанги утворюються залишкові напруження стиску, які добре впливають на його втомну міцність, а в центральній частині виробу - залишкові напруження розтягу.

Економічний ефект від впровадженої технології визначений за умов виготовлення штанги в умовах Бориславської ЦБВО (табл.5.4). Розрахунок проводився за таких вихідних умов станом на 2020 рік:

Ціна сталі 35ХМ – 29,054 грн/кг;

Довжина заготовки для виготовлення однієї штанги – 8,2 м;

Норма часу на проточування однієї ремонтної штанги в умовах фірми «ТАКТ» – 1,6 год;

Тарифна ставка токаря четвертого розряду – 58, 605 грн.

Всі операції з виготовлення насосної штанги будуть однаковими. В даному випадку порівнюємо вартість матеріалу для виготовлення нової штанги та трудові витрати на проточування ремонтної штанги.

Таблиця 5.4 - Порівняльна характеристика собівартості виготовлення нової та ремонтної насосної штанги

№п/п	Діаметр насосної штанги, мм	Вартість матеріалу на одну штангу, грн	Трудові витрати на виготовлення, грн	Трудові витрати на проточування, грн	Собівартість виготовлення, грн
1	22	709,96	887,04	-	1597
2	19	531,28	1002, 72	-	1534
3	22 ремонтна	-	887,04	93,77	980,81
4	19 ремонтна	-	1002, 72	93,77	1096,5

Якщо глибина свердловини в середньому 1600м, то середня необхідна кількість насосних штанг на одну свердловину становить 200 шт.

Для насосної штанги Ф22мм:

Вартість нової штанги $1597 \times 200 = 319400$ грн

Вартість ремонтної штанги $980,81 \times 200 = 76162$ грн

Тоді, економічний ефект для компоновки однієї свердловини ремонтною штангою становить:

$319400 - 76162 = 243238$ грн

5.4 Технологія контролю і результати обстеження насосної штанги

Об'єктом обстеження був фрагмент насосної штанги загальною довжиною 420 мм, що включав головку і частину тіла (рис.5.11) відповідно до ГОСТ 13877 – 96. Попередні дані про термін та умови експлуатації, а також тривалість випробувань на втомну довговічність відсутні, сертифікати на матеріал штанги теж відсутні.



Рисунок 5.11 - Фрагмент насосної штанги

Для обстеження даного зразка насосної штанги на предмет наявності поверхневих і підповерхневих дефектів проведений комплекс робіт, що передбачав візуально-оптичний контроль для виявлення поверхневих дефектів, контроль проникаючими речовинами для виявлення поверхневих дефектів, контроль магнітопорошковий для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів. Визначення внутрішніх дефектів не проводилось. Контрольована ділянка – тіло штанги і нижня частина головки штанги.

Перелік методів, нормативних документів та технічних засобів для їх реалізації подані в таблиці 5.5 [38].

Таблиця 5.5 – Методи контролю і технічні засоби для їх реалізації

№ п/п	Метод контролю	Умовний рівень чутливості	Технічні засоби та матеріали контролю	Нормативний документ, що регламентує технологію контролю
1	2		3	4
1	Візуально-оптичний	Не нормується	- лупа оглядова ЛПК-471 (2 ^x); - лупа оглядова ЛП-6 (6 ^x); - лупа вимірювальна ЛІ-10 (10 ^x); - штангенциркуль ШЦ-1-125-0,05 з глибиноміром; - лінійка металева інструментальна Л-500 (500 мм)	ГОСТ 23479-79; РД 34.10.130-96; ДСТУ ISO 17637:2003
2	Капілярний метод (метод проникаючих речовин)	Не нижче ІІ	комплект дефектоскопічних матеріалів MR Chemie GmbH, (Німеччина) в аерозольному упакованні ємністю 500 мл: - пенетрант MR-68; - очисник MR-88; - проявник MR-70; - зразок для контролю якості матеріалів для капілярної дефектоскопії PCO-КД-20-09; - фен промисловий	ГОСТ 18442-80; РД-13-06-2006
3	Магніто-порошковий	Не нижче Б	- магнітний дефектоскоп ПМД-70 з комплектом намагнічуючих пристроїв (сер. №378); - магнітний індикатор - рідкий магнітний аерозоль MR 76 S (MR Chemie GmbH, (Німеччина)) в аерозольному упакованні ємністю 500 мл; - біла контрастна фарба MR 72 (MR Chemie GmbH, (Німеччина)) в аерозольному упакованні ємністю 500 мл; - контрольний зразок для перевірки магнітних індикаторів магнітної дефектоскопії PCO-МД-15-09	ГОСТ 21105-87; РД-13-05-2006

Візуально-оптичний контроль

1) Проведена очистка оглядової поверхні досліджуваного зразка від бруду та слідів корозії за допомогою ручного щіткового інструменту. Додаткова очистка контрольованої ділянки розчинником.

2) Попередній огляд проводився візуально та з використанням оглядової лупи ЛПК-471. Місця та сумнівні ділянки, що викликали підозру щодо наявності дефекту, були оглянуті через лупу 6-кратного та 10-кратного збільшення із застосуванням джерела додаткового місцевого освітлення.

Результати обстеження: зовнішня поверхня тіла штанги зі слідами загальної корозії, загальна корозія поєднується з локальними ділянками корозійних виразок умовним діаметром до 0,5 мм. Присутні неглибокі риси малої протяжності (до 5 – 10 мм), одна глибока подряпина протяжністю 7 мм і дефекти механічної обробки тиском (рис.5.12). Дійсне значення діаметру тіла штанги за результатами трикратних вимірювань в трьох місцях тіла становить 19,2 мм.



Рисунок 5.12 - Фрагмент штанги зі слідами загальної корозії в поєднанні з локальними ділянками корозійних виразок

Тріщин, сколів, викришувань, відшарувань металу не виявлено.

Капілярний контроль

1) Проведена очистка та знежирення контрольованої ділянки розчинником.

2) Здійснена сушка поверхні штанги для видалення залишків розчинника з порожнин дефектів. Сушка інтенсифікувалась підвищеною температурою струменю теплого повітря з фену (не вище +140 °С).

3) Досліджувана ділянка просочувалась індикаторним пенетрантом з комплекту дефектоскопічних матеріалів (рис.5.13). Час витримки пенетранту на поверхні зразка – 10 хв при температурі зовнішнього середовища +20 °С.



Рисунок 5.13 – Капілярний контроль фрагменту штанги

4) Видалено надлишки пенетранта з поверхні штанги для виключення утворення фону (при неповному видаленні пенетранта), виникнення помилкових індикацій (при збереженні пенетранта на окремих ділянках, в заглибленнях). Видалення виконувалось протиранням спочатку змоченими очисником MR-88 серветками, а потім сухими паперовими серветками. При такому очищенні досягається максимальна збережуваність пенетранта в порожнинах дефектів.

5) Проведено виявлення пенетранта в порожнинах дефектів білим суспензійним проявником з комплекту дефектоскопічних матеріалів. Огляд поверхні тіла штанги та нижньої частини замка проводився через 20 хвилин після нанесення проявника і повного його висихання на поверхні. Огляд проводився візуально та з використання лупи ЛПК-471.

Стан поверхні після нанесення проявника зображений на рис.5.14.

6) Після фотофіксації результатів обстеження проведено очищення від проявника мильним розчином і сушка поверхні штанги тепловим повітрям з фену.

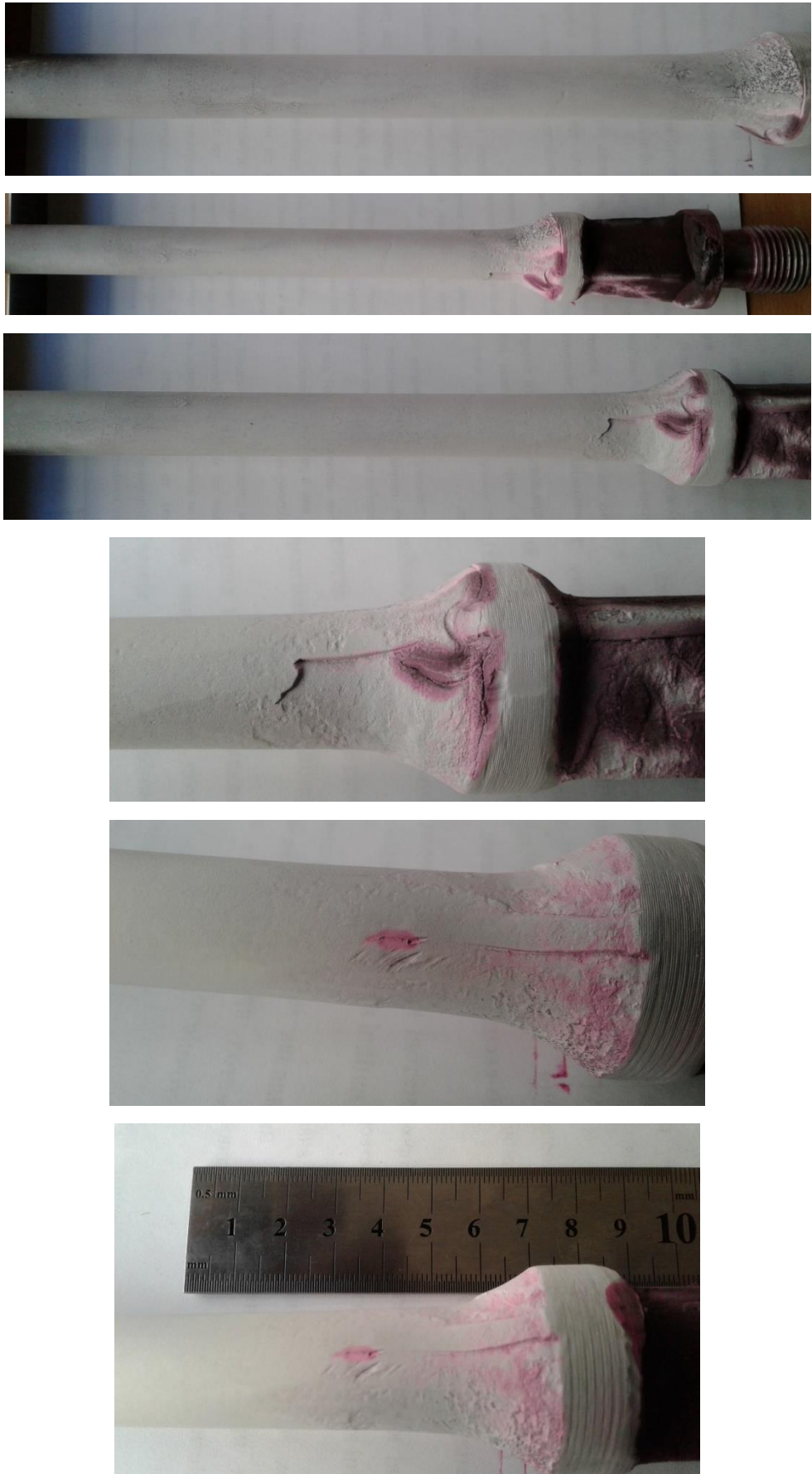


Рисунок 5.14 - Стан поверхні фрагменту штанги після нанесення проявника
Результати обстеження: на тілі штанги дефектів порушення суцільності не

виявлено. Індикаторні сліди утворилися в місцях дефектів механічної обробки тиском в перехідній зоні між тілом штанги і нижньою частиною замка, а також в місці глибокої подряпини, виявленої при візуальному огляді.

Магнітопорошковий контроль

1) Проведена очистка та знежирення контрольованої ділянки розчинником та сушка.

2) Для покращення візуалізації чорного магнітного порошку використовуваної суспензії на поверхні штанги на неї попередньо нанесено тонкий шар білої фарби-контрасту (товщина шару – не більше 40 мкм) (рис.5.15). Час висихання фарби – до 5 хв.



Рисунок 5.15 – Нанесення на фрагмент штанги шару білої фарби-контрасту

3) Проведено намагнічування тіла і замка штанги соленоїдом, що входить в комплект дефектоскопа ПМД-70 (рис.5.16). Струм намагнічування – постійний, сила струму – 80А. Спосіб проведення контролю після намагнічування – по залишковій намагніченості.



Рисунок 5.16 - Дефектоскоп ПМД-70

4) Після намагнічування нанесено на контрольовану ділянку штанги магнітну суспензію з аерозольного балона. Розмір основної маси частинок порошку становив 2,5 – 5 мкм.

5) Після повного стікання рідини з контрольованої поверхні оглянуто поверхню тіла і замка штанги на предмет виявлення місць, покритих відкладеннями порошку. Огляд проводився візуально та з використанням оглядових луп ЛПК-471 і ЛП-6. Місця скупчення порошку зображені на рис.5.17.

6) Після фотофіксації результатів було проведене розмагнічування штанги.

Результати обстеження: на тілі штанги дефектів порушення суцільності не виявлено. Скупчення частинок порошку утворилися в місцях дефектів механічної обробки тиском у перехідній зоні між тілом штанги і нижньою частиною замка, а також у місці глибокої подряпини, виявленої при візуальному огляді та перевірки капілярним методом.



Рисунок 5.17 - Місця скупчення порошку на поверхні фрагменту штанги в процесі проведення магнітопорошкового контролю

5.5 Наповнення полімерних композиційних матеріалів

Рішення завдань розробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) поєднати з високими показниками механічної міцності, жорсткості, хімічної стійкості та іншими експлуатаційними властивостями з низькою вартістю практично неможливо без застосування поширених дешевих органічних і неорганічних наповнювачів [96]. Причому, при створенні наповнених ПКМ необхідно враховувати не тільки властивості полімерного зв'язуючого наповнювача, а й можливість реалізації їх властивостей в композиті, яка визначається вмістом, типом, ступенем дисперсності і формою наповнювача. Введення в полімерні композиційні матеріали різних наповнювачів призводить до зміни фізико-механічних властивостей вихідної полімерної матриці. Класифікація наповнювачів за формою, розміром і впливом на фізико-механічні властивості поліуретанових, епоксидних і поліефірних композитів представлена на рисунку 5.18.

Відповідно до запропонованої класифікації виділені наступні групи наповнювачів:

- дисперсні - мікрокварц, мікробар, сажа, тальк, деревне борошно, алюмінієва пудра, крохмаль, зола, доломіт, маршалит, аеросил, гіпс, діоксидтитан, каолін, слюда, тверді порошкоподібні полімери (відходи пластичних мас), порожнисті керамічні, скляні та полімерні мікросфери;

- волокнисті - безперервні кевларові, скляні, базальтові, графітові, борні, арамідні волокна і на їх основі тканини, а також воллостоніт, рубані і мелені скляні волокна, ниткоподібні монокристали;

- об'ємні - спінені гранули, тирса, керамзит, відходи рослинного походження.

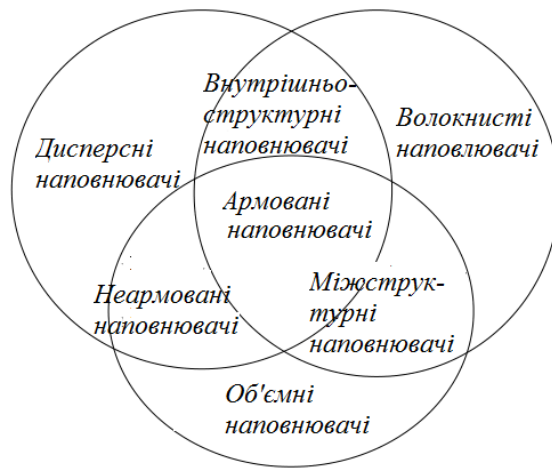


Рисунок 5.18 - Класифікація наповнювачів за формою, розміром і впливом на фізико-механічні властивості поліуретанових, епоксидних та поліефірних КОМПОЗИТІВ

Вид і якість дисперсного наповнювача, форма і розміри його часто впливають на деформаційні характеристики полімерних композитів [90, 95,96]. За формою частинки наповнювачів бувають: пластинчасті, волокнисті, лускаті, округлі і монокристалічні. При аналізі механізмів дії наповнювачів на сітчасті полімери, такі, як жорсткий поліуретан, слід брати до уваги, що процес затвердіння відбувається в присутності з розвиненою інертною поверхнею, яка впливає на швидкість полімеризації або поліконденсації, а також на процеси формування структури матеріалу. Впливаючи на композит, наповнювачі діляться на активні, які підвищують експлуатаційні властивості матеріалів, та інертні, використовувані для зниження економічної складової. Такий розподіл наповнювачів вельми умовний, тому що покращуючи одні характеристики, наповнювачі можуть негативно впливати на інші. Крім того, активність наповнювача може проявляється тільки при його певному змісті в системі. Внутрішня напруга яка безпосередньо не залежать від розмірів частинок, але енергія деформації навколо великих частинок, обумовлена залишковими напруженнями, набагато вища, ніж біля дрібніших. Збільшення розмірів частинок призводить до зменшення їх поверхневої енергії, що тягне за собою зменшення енергії руйнування, і тим самим призводить до зниження міцності

наповненого полімерного композитного матеріалу.

Збільшення дисперсності наповнювача (зменшення геометричних розмірів частинок) сприяє зміцненню композитів тільки до певних меж. Введення наповнювача з розміром частинок менших від розміру кристалів полімерного сполучного викликає ефект знеміцнення композитного матеріалу. З метою зниження витрат сполучного в композиційному матеріалі застосовують наповнювачі з оптимальними розмірами частинок. У антикорозійний склад для надання покриттям необхідної міцності, кислото- і лугостійкості, вводять відповідні наповнювачі. Для цього найбільш доцільно використовувати мінеральні наповнювачі такі, як кварцовий пісок і маршаліт, що дозволяють отримувати ПК з високими фізико-механічними характеристиками і хімічною стійкістю. Мелений кварцовий пісок [32] -найбільш дешевий і доступний наповнювач, що володіє високою стійкістю до кислот. Маршаліт - різновид кварцового піску, представляє собою тонкомолотий порошок білого кольору, що володіє кращим зчепленням з полімерним сполучником. Для підвищення стійкості долугів застосовують тонкомолотий трепел. Вплив типу наповнювача, форми і орієнтації його частинок на релаксаційні властивості полімерної матриці, а також на властивості кордону розділу фаз, слід розглядати в зв'язку і з проникністю. Крім ефектів, характерних для механічного відгуку, додаткові труднощі виникають через розчинність проникаючого агресивного середовища в матриці граничної області або в наповнювачі. Проникність характеризує кількість речовини, що проникає через мембрану даної товщини за даний час і залежить як від розчинності, так і від коефіцієнта дифузії. Встановлено, що в присутності непроникного наповнювача проникність знижується з двох причин: збільшується довжина шляху молекул сполучника і зменшується площа поперечного перерізу матриці, доступної для дифузії. Перший ефект зазвичай позначають як «фактор викривлення шляху» (τ), який еквівалентний відношенню довжини шляху молекули до товщини мембрани. Коли другий ефект пропорційний об'ємному змісту наповнювача, вважається, що посилення сітчастих полімерів із застосуванням наповнювачів відбувається переважно за

рахунок фізичних зв'язків, хоча виключається хемосорбція окремих полімерів на розвиненій поверхні наповнювача. Залежно від активності і хімічної будови наповнювачів і полімерів, а також способу отримання наповнювачів ПКМ, природа і число зв'язків утворюються на межі розділу фаз вельми різні, що впливає на експлуатаційні характеристики матеріалів [59]. Застосування наповнювачів зменшують витрату смол і затверджувачів, знижується коефіцієнт теплового розширення, а в ряді випадків збільшується життєздатність сполучних за рахунок виборчої сорбції компонентів і зменшення екзотермічного ефекту затвердіння внаслідок високої теплопровідності твердих частинок. Особливий інтерес для створення ПКМ, що поєднують високі характеристики міцності, показники при статичному, циклічному навантаженні і хімічної стійкості, що має важливе значення при експлуатації в умовах дії агресивних середовищ і знакозмінних навантажень, представляє спільне застосування наповнювачів і модифікаторів. Міцність пластифікованих і наповнених ПКМ екстремальним чином залежить від ступеня наповнення і площі питомої поверхні наповнювачів, тобто пластифікатор практично не змінює характеру концентраційних залежностей основних експлуатаційних властивостей. Також для наповнених пластифікованих полімерів зберігаються загальні закономірності антипластіфікації. При цьому відбувається взаємна компенсація недоліків кожного з цих методів модифікації (зокрема, зниження теплостійкості - при антипластіфікації, технологічних характеристик при наповненні). Встановлено, що зі збільшенням об'ємного вмісту наповнювачів товщина шарів сполучного між твердими частинками зменшується, і якщо вона менша від розміру зони пластифікаторів, еластифікуючий ефект повністю пригнічується [5; 20; 96; 95].

5.6 Шляхи підвищення ресурсу насосних штанг з полімерних композитів

Основною складовою установки є насосні штанги, тому їх руйнування призводить до збою всієї системи установки. Крім того, колона насосних штанг працює в динамічному режимі, тобто постійно перебуває в прискореному русі. Насосні штанги також експлуатуються у суворих умовах з високими та низькими температурами, в присутності корозійно-агресивного середовища, а також з максимальними навантаженнями. Суцільні сталеві насосні штанги важкі - їхня маса без муфт може коливатися від 1,08 до 5,4 кг/м (за стандартними розмірами). Вага сталевих штанг є більшою від ваги рідини, яку вона піднімає приблизно у 2-3 рази. Сталь не є корозійностійка, а також не є стійка до зношування та тріщиноутворення особливо від корозійної втоми. Гібридні насосні штанги в три рази є легшими за сталеві, є корозійностійкими, проте їх модуль потужності складає 1/4 від сталевих, тобто вони значно видовжуються при розтягу. Вони дуже вразливі до напружень стиску за втрати стійкості. Головними причинами простоїв насосних установок та аварійних ситуацій є відмови у роботі насосних штанг. Є можливість для вирішення цих проблем використовувати насосні штанги для експлуатації з інших матеріалів [25; 18].

Досліджено згинальну втомну поведінку гібридних насосних штанг. Гібридні композитні стрижні складаються з односпрямованих вуглецевих волокон в осерді і скляних в оболонці. Пошкодження оцінювали в процесі випробування, контролюючи втрату жорсткості залежно від кількості пройдених циклів, а втомну міцність на згин визначали з моменту появи тріщин і повного руйнування. Для визначення характеристики прогресування пошкодження, а також механізмів руйнування використовували методику акустичної емісії та мікроскопічне дослідження. Число циклів до руйнування залежало від прикладеної величини напруження. Для визначення ймовірності відмови згідно кривої σ -N використовувався двопараметричний аналіз Вейбула. В результаті випробування пошкодження було виявлене і розповсюджувалося в результаті

розтріскування матриці і руйнування в оболонці у зв'язці скляних волокон (рис. 5.19). Виявлено, що втома при згині починається тоді, коли гібридна насосна штанга піддається згину, та перевищує на 42 % границю міцності на згин. Пошкодження досягло граничного напруження вздовж контакту скловолокно/вуглеволокно через концентрацію напружень, яке виникло між двома матеріальними системами, що призвело до асимптотичної поведінки втрати жорсткості. Так як пошкодження не поширилося на ядро вуглеволокна, статичні механічні властивості збереглися приблизно до 85% границі міцності або і більше [20; 12; 17].

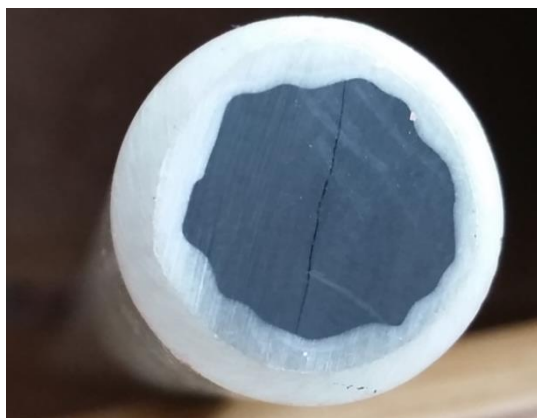


Рисунок 5.19 – Поперечний переріз гібридної насосної штанги з тріщиною, яка утворилася у вуглепластиковій серцевині (зліва) та розшарування склопластикової оболонки гібридної насосної штанги, яке утворилося після експлуатації в свердловині (справа) на промислах у Китаю

Для дослідження втомної міцності було використано чотири зразки (рис. 5.20) гібридних штанг (вуглепластик зі склопластиком) діаметром 19мм і довжиною до 320 мм китайського виробництва. Зразки досліджувалися при різному навантаженні та напруженні згину на стенді ЗКШ-25 при консольному згині частотою $n=950\text{хв}^{-1}$.

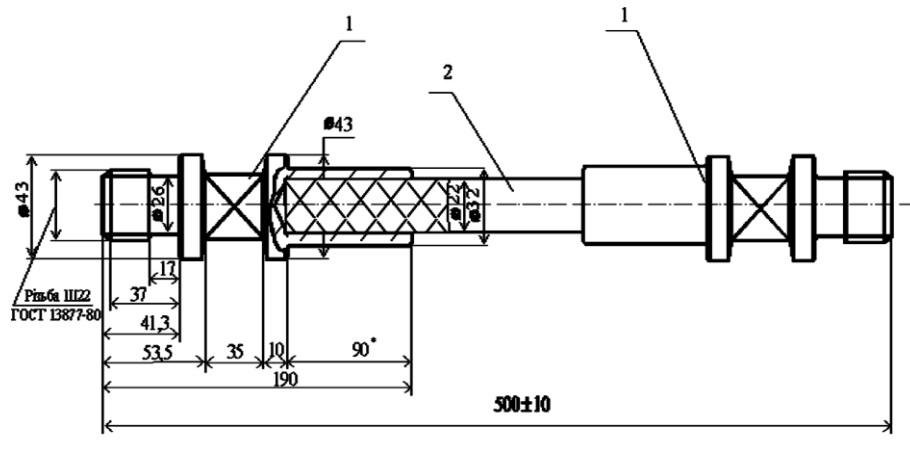


Рисунок 5.20 - Ескіз зразка для випробування на втомну міцність гібридних насосних штанг

Для проведення експериментальних досліджень було визначено вагу вантажу при відповідному напруженні згину. Напруження згину буде рівне:

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W} , \quad (5.3)$$

де $M_{зг} = (P_B + P_{шт}) L$ – момент згину;

$W = \frac{\pi d_{шт}^3}{32}$ - осьовий момент опору.

Відповідно напруження згину рівне:

$$\sigma = \frac{(P_B + P_{шт})L 32}{\pi d_{шт}^3} , \quad (5.4)$$

звідки вага вантажу буде рівна:

$$P_B = \frac{\sigma \pi d_{шт}^3 - 32LP_{шт}}{32 L} . \quad (5.3)$$

Проведено дослідження для достовірності результатів при 4 різних напруженнях згину. Проводимо розрахунки ваги вантажу.

Зразок №1 – при напруженні згину $\sigma = 120$ МПа.

$$P_B = \frac{120 \cdot 10^6 \cdot 3,14(19 \cdot 10^{-3})^3 - 32 \cdot 0,26 \cdot 20}{32 \cdot 0,26} = 290 \text{ Н}$$

Після відпрацювання 7,34 млн. циклів утворилось три тріщини: $l_1=32$ мм, $l_2=30$ мм, $l_3= 5$ мм (рис. 5.13). Проведено залікування тріщин першого зразка бандажем із скловолокна ($l=50$ см, $B=10$ см – 6 шарів по контуру штанги в місці

виникнення тріщин) та епоксидної смоли. В процесі проведення повторного випробування даний зразок успішно пропрацював 9,4млн. циклів (рис. 5.21).



Рисунок 5.21 – Загальний вигляд зразка гібридної штанги з повздожнім розшаруванням та склопластиковим бандажем для випробувань на втому при згині

Зразок №2 – при напруженні згину $\sigma = 160$ МПа.

$$P_B = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot 3,14(19 \cdot 10^{-3})^3 - 32 \cdot 0,26 \cdot 20}{32 \cdot 0,26} = 394,2 \text{ Н}$$

Після відпрацювання 81200 циклів утворилось шість тріщин: $l_1=27$ мм, $l_2=25$ мм, $l_3=25$ мм, $l_4=20$ мм, $l_5=17$ мм, $l_6=5$ мм.

Зразок №3 – при напруженні згину $\sigma = 140$ МПа.

$$P_B = \frac{140 \cdot 10^6 \cdot 3,14(19 \cdot 10^{-3})^3 - 32 \cdot 0,26 \cdot 20}{32 \cdot 0,26} = 350 \text{ Н}$$

Після відпрацювання 1,4372 млн. циклів утворилось шість тріщин: $l_1=74$ мм, $l_2=73$ мм, $l_3=35$ мм, $l_4=33$ мм, $l_5=33$ мм, $l_6=30$ мм.

Зразок №4 – при напруженні згину $\sigma = 150$ МПа.

$$P_B = \frac{150 \cdot 10^6 \cdot 3,14(19 \cdot 10^{-3})^3 - 32 \cdot 0,26 \cdot 20}{32 \cdot 0,26} = 368,3 \text{ Н}$$

Після відпрацювання 1,185 млн. циклів при відповідно заданих умовах утворилося три тріщини: $l_1=12$ мм, $l_2=10$ мм, $l_3=10$ мм.

Після отриманих результатів проведено залікування тріщин зразків №1,3 і 4 бандажем із скловолокна (довжиною 50см та шириною 10см накладеного в 6 шарів по контуру штанги в місці виявлення тріщин) та епоксидної смоли.

При дослідженні відпрацьованих зразків були виявлені наступні дефекти (рис. 5.22):

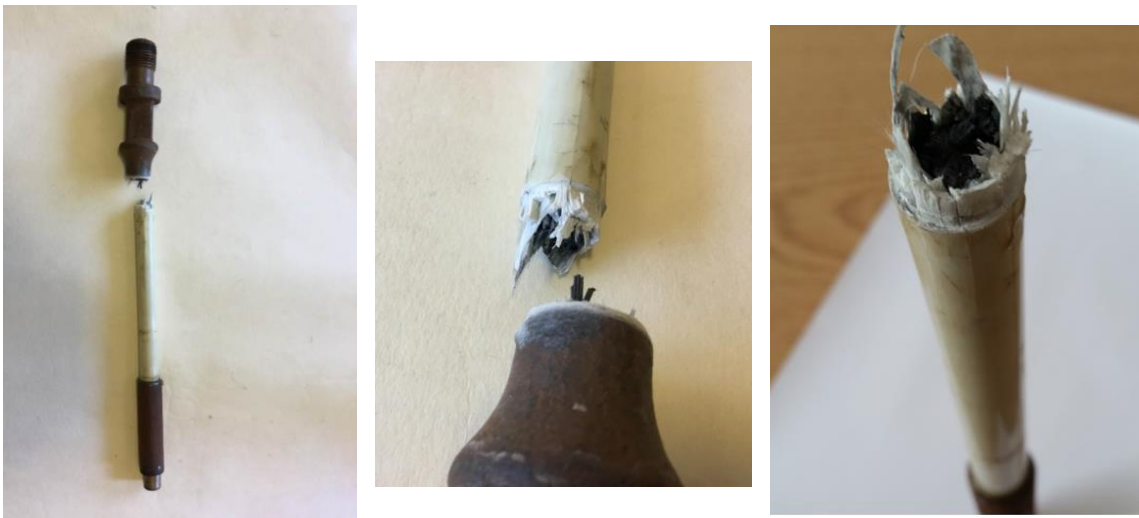


Рисунок 5.22 – Характерні дефекти і вид зламів відпрацьованих зразків

Згідно отриманих результатів побудована діаграма втомної міцності гібридних насосних штанг при циклічному згині (1 – початок зародження тріщин, 2 – кінцевий злам штанги) в порівнянні із склопластиковими насосними штангами (рис.5.23).

У процесі проведення повторних випробувань отримано такі результати:

Зразок №1 успішно пропрацював 9,4 млн. циклів; зразок № 3 - 1,854 млн. циклів; зразок №4 - 1.983 млн. циклів. Отримані дані зводимо в таблицю 5.6.

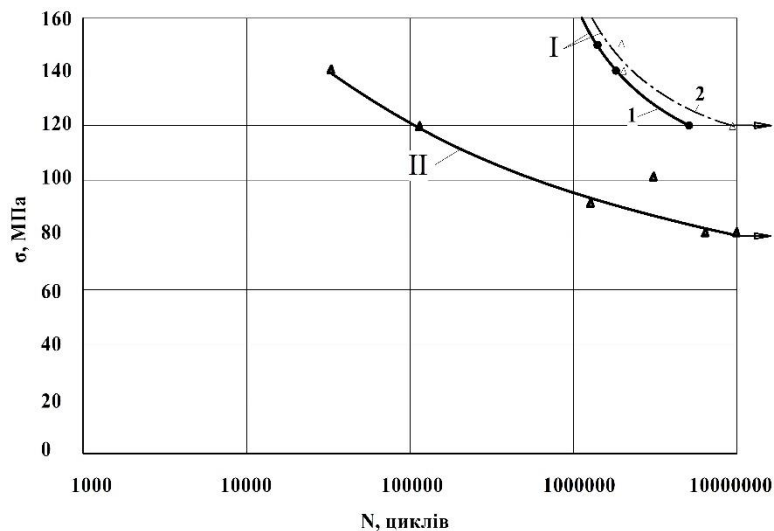


Рисунок 5.23 – Діаграма втомної міцності гібридних насосних штанг (крива I, 1 – початок зародження тріщин, 2 –кінцевий злам штанги) та склопластикових насосних штанг (крива II) при циклічному згині

Таблиця 5.6 - Отримані результати згідно розрахунку та отриманих досліджень

Зразок №	Напруження згину σ , МПа	Вага вантажу P_v , Н	К-сть відпрацьов. циклів до появи тріщин, млн.	К-сть тріщин	Парам. тріщини l , мм	Примітки
1	120	290	7,34	3	32, 30, 5	Не зламався
1 після ремонту	120	290	9,4	-	-	Не зламався
2	160	394,2	0,0812	6	27, 25, 25 20, 17, 5	Зламався
2 після ремонту	160	394,2	-	-	-	-
3	140	350	1,4372	6	74, 73, 35 33, 33, 30	Не зламався
3 після ремонту	140	350	1,854	-	-	Зламався
4	150	368,3	1,185	3	10, 10, 12	Не зламався
4 після ремонту	150	368,3	1,983	-	-	Зламався

На зразках, що працювали при напруженнях згину 120, 140, 150 і 160 МПа було виявлено тріщини різної довжини, що наведені в таблиці 5.4.

На основі цих даних побудована графічна залежність (рис.5.24).

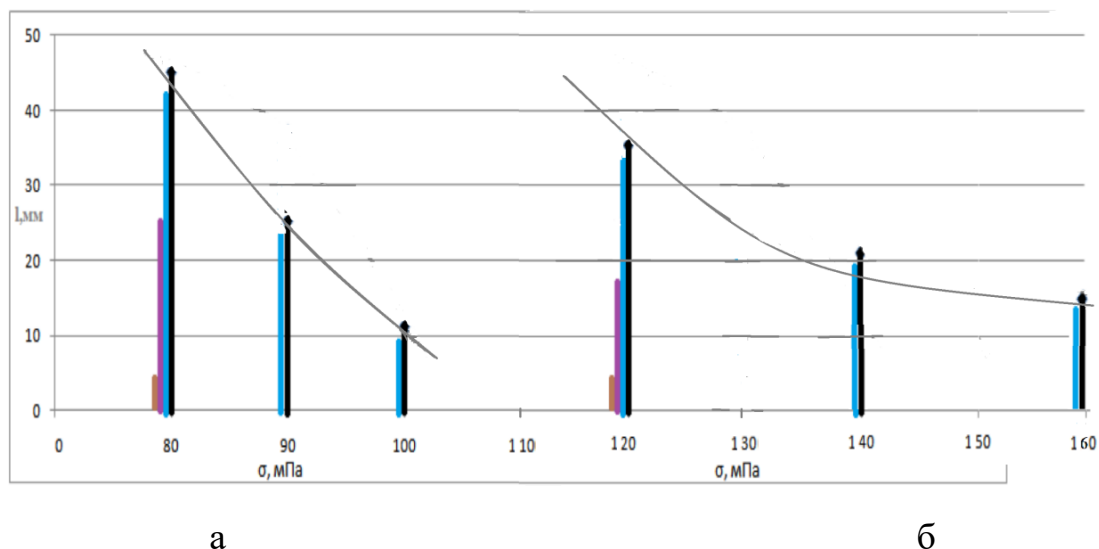


Рисунок 5.24 – Графік залежності кількості та довжини тріщин від напруження згину склопластикових (а) та гібридних (б) насосних штанг

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки.

Зразок гібридної насосної штанги в процесі випробування при напруженні в 140, 150, 160 МПа зламався в місці з'єднання сталеві головки з тілом штанги, витримавши при цьому відповідно 1,4372, 1,185, 0,0812 млн. циклів. Це свідчить про те, що гібридні насосні штанги не можуть витримувати високі напруження згину.

Досліджувальний зразок гібридної насосної штанги при напруженні згину 120 МПа пройшов 7,34 млн. циклів і не зламався, проте з'явилися численні втомні тріщини. Це свідчать про те, що гібридні штанги можуть витримувати напруження згину до 120 МПа.

Відновлений зразок №1 при напруженні згину в 120 МПа пройшов 9,4 млн. циклів відповідно не зламався та не виявлено жодної тріщини. Такі результати свідчать про те, що згідно із запропонованою методикою, відновлені гібридні

штанги при напруженні 120 МПа можуть з легкістю працювати значно більше часу до появи тріщин.

Відновлені зразки №3 та 4 пройшли відповідно 1,854 та 1,983 млн. циклів та зламалися в місці з'єднання сталеві головки з тілом штанги. Це свідчить про те, що дані гібридні насосні штанги не в змозі витримувати високі напруження згину після їх відновлення [12; 15; 17; 20; 24; 31].

5.7 Розроблення з'єднання гібридних насосних штанг

Такі штанги з'єднуються між собою стальними муфтами (ГОСТ 13877-96 Штанги насосные и муфты штанговые. Технические условия). Недоліком такої штанги є значна вага, що передається на головку балансира та невисока її надійність. Останніми роками використовують склопластикові, вуглепластикові та гібридні насосні штанги. Гібридні насосні штанги мають оболонку із скловолокна та вуглеволокнисте осердя. Вуглецеві волокна є жорсткими і використовуються для конструкцій, виготовлених із композитних матеріалів, в яких вуглецеві волокна пов'язані з епоксидною смолою, яка є матричним (сполучним) матеріалом. Це дає великі техніко-економічні переваги в порівнянні зі звичайними сталевими штангами через високу міцність, корозійну стійкість та інші важливі фізико-механічні властивості матеріалу. Гібридна насосна штанга являє собою стрижень з гладкими кінцями. Однак при всіх позитивних експлуатаційних якостях гібридних штанг залишається проблема надійного їх з'єднання в свердловині у процесі експлуатації.

Важливим завданням при проектуванні колони гібридних насосних штанг є вибір типу їх з'єднання, тобто з'єднання сталеві головки з тілом гібридної штанги. Основним параметром при проектуванні такого з'єднання є максимальне осьове навантаження розтягу, яке воно витримує. Також потрібно враховувати втомні характеристики з'єднання, складність конструкції і технології виготовлення, можливість зміни механічних характеристик матеріалів під впливом високої температури та агресивного середовища в свердловині.

На даний час найбільше застосовуються з'єднання з використанням клею, а також з'єднання виконані шляхом обтискання сталевго бандажу. З'єднання за допомогою клею рекомендовано стандартом API і витримує досить високі навантаження розтягу, проте технологія виготовлення сталевго головки досить складна. Значно простішою є технологія з'єднання шляхом пластичної деформації сталевго бандажу. Але таке обтискання потребує значного зусилля для досягнення максимальної міцності з'єднання під дією осьового навантаження розтягу [24; 25].

Запропоновано з'єднання (рис 5.17) тіла штанги з полімерно-композиційних матеріалів зі сталевгою головкою, яке реалізовує як адгезивні так і клинові ефекти. Завданням даного варіанту є розробка конструкції штанги, що має високу міцність та низьку концентрацію напружень.

Завдання полягає в розробці конструкції з'єднання гібридних насосних штанг, що має високу міцність, високу плавність передач напружень за рахунок досягнення стабільності, зменшення ваги колони насосних штанг та можливість заміни спрацьованих деталей новими.

Поставлене завдання вирішується затисканням тіла насосної штанги внаслідок переміщення клинів відносно конусної поверхні. На рисунку 5.25 зображено з'єднання гібридних насосних штанг між собою. З'єднання складається з тіла гібридної насосної штанги 1, гвинта 2, і розтискних клинів 3, які з'єднані між собою гумою 4. Тіло гібридної штанги 1 встановлюється в отвір де встановлені клини 3. Внаслідок прокручування гвинта 2 – клини 3 переміщуються по конусній поверхні всередині і затискають тіло штанги утворюючи міцне з'єднання, яке при потребі можна роз'єднати відгвинтивши гвинт 2.

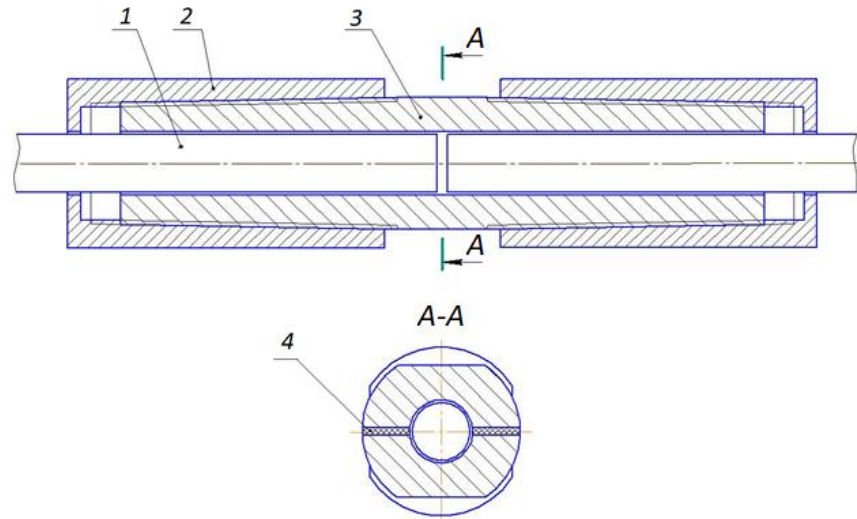


Рисунок 5.25 - З'єднання гібридних насосних штанг

Надійність з'єднання залежить від технічних характеристик обох матеріалів. Створення різноманітних конструкцій штангових колон спрямовано на збільшення ресурсу їх роботи. У вітчизняній промисловості для виготовлення насосних штанг здебільшого використовують сталь. В останні роки властивостям скловолокон та вуглецевих волокон надають більшу перевагу перед сталевими. Вони мають в три рази меншу масу; високу корозійну стійкість; більшу міцність на розрив; більший, ніж у сталевих та склопластикових штанг ресурс циклічних навантажень. Зниження загальної ваги колони штанг дає економію енергозатрат, а також мала маса штангової колони дозволяє збільшити глибину спуску насоса.

Найбільш близьким до запропонованого є такі способи з'єднання головки штанги з тілом: з'єднання охоплюючого типу, коли стержень із склопластику жорстко з'єднаний із внутрішньою поверхнею порожнистої сталевий головки; з'єднання намотуваного типу, коли головка клеєна всередину склопластикового стержня; комбінована схема з'єднання, коли металевий елемент головки вставлений в склопластиковий стержень, а ззовні обтиснутий сталевим бандажем або композиційним матеріалом. Створення з'єднань із різнорідних матеріалів вирішує завдання забезпечення малих концентраторів напружень.

Існує такий вид з'єднання (США № 4919560, МПК F16 В 11/00, опубл. 28.04.89), який складається із тіла штанги з полімерно-композиційного матеріалу і сталевих головок, закріплених з обох кінців штанги. Суцільний кінець тіла насосної штанги заходить в гніздо сталевої головки. Внутрішня поверхня головки містить три кільцеві клинові проточки (канавки), утворені парами спрямованих одна до одної конічних поверхонь. Порожнину між внутрішньою поверхнею гнізда та поверхнею стержня заповнюють клеєм та з'єднують. Таке клейове з'єднання штанги з головками має достатню міцність у порівнянні з міцністю на розрив тіла штанги.

Насосна штанга працює в складних експлуатаційних умовах і зазнає змінних навантажень із значним коефіцієнтом асиметрії. Це вимагає проектування колон насосних штанг з великим коефіцієнтом запасу міцності. Із збільшенням глибини спуску колони зростає навантаження на штангу, особливо на клейове з'єднання головки із стрижнем. І тому це з'єднання є недостатньо надійним.

Існує більш міцний вид з'єднання (заявка Франції N 2537201, опубл. 08.06.84, патент США N 4822201, опубл. 18.04.89) в якому наконечник має поздовжній розріз, в який вставляється кінець елемента штанги таким чином, що між двома стискуючими елементами утворюється кільцева камера, що має більший розмір на дні, ніж на відкритому кінці, причому камера

заповнена адгезивним матеріалом. Таке з'єднання є більш надійним, міцнішим та безпечнішим ніж попередньо викладене, але недоліком таких конструкцій є неможливість забезпечення рівномірного зазору між поверхнею штанги і внутрішньою поверхнею наконечника при заповненні його адгезивом, що призводить до істотного зниження міцності кріплення штанги в наконечнику [14].

5.8 Висновки до розділу 5

За результатами проведених досліджень розроблено технологію відновлення насосних штанг. Результати експериментів свідчать, що запропонований метод відновлення штанг забезпечує зростання обмеженої границі витривалості зразків згідно запропонованої технології відновлення штанг в 3-4 рази [22 - 24].

Розроблене ізоляційне композитне покриття насосних штанг виконує не тільки функцію протикорозійного захисту, але і механічно зміцнює поверхню насосної штанги [5; 15; 31].

Згідно з обстеженням зразка насосної штанги на предмет наявності поверхневих і підповерхневих дефектів проведений комплекс робіт та отримані такі результати:

- після проведеного візуально-оптичного контролю - тріщин, сколів, викришувань, відшарувань металу не виявлено;

- у процесі капілярного контролю на тілі штанги дефектів порушення суцільності не виявлено, індикаторні сліди утворилися в місцях дефектів механічної обробки тиском в перехідній зоні між тілом штанги і нижньою частиною замка, а також в місці глибокої подряпини, виявленої при візуальному огляді;

- у процесі проведення магнітопорошкового контролю на тілі штанги дефектів порушення суцільності не виявлено, скупчення частинок порошку утворилися в місцях дефектів механічної обробки тиском в перехідній зоні між тілом штанги і нижньою частиною замка, а також у місці глибокої подряпини, виявленої при візуальному огляді та перевірки капілярним методом.

Зона приповерхнева після проточки представляє собою пластично деформований шар товщиною приблизно 40 – 50 мкм, мікротвердість якого вища за мікротвердість основного матеріалу на 12-20% (рис.2). Ця зона не травиться кислотою і представляє собою білий шар. Зона 2 - це основний матеріал, який складається із зерен сорбіту гартування, що отриманий у результаті проведеної нормалізації та прошарків фериту. Розміри зерен сорбіту

знаходяться у діапазоні від 10 до 40 мкм [12; 20; 24].

Результати досліджень свідчать про те, що гібридні насосні штанги можуть витримувати напруження згину до 120 МПа, а також не можуть витримувати високі напруження згину після їх відновлення [12; 17].

Матеріали, наведені у даному розділі, відображено у таких публікаціях:

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 В.В. Копей, А.В. Stefanyshyn, and Т.Р. Venhrynyuk. Fatigue strength of hybrid pump rods. Material Science. Vol. 54. No. 5 March 2019. P. 739-742. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00240-z> (Scopus)

3 А.В. Stefanyshyn. Restoration of hybrid sucker rods technical characteristics. Modern engineering and innovative technologies. Issue №11, Part 1, March 2020. P. 22-26. (Index Copernicus)

4 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 1(34). С.120-125.

5 Копей Б.В., Блажків Т.Б., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Контроль руйнування та росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: тези доповідей 6-ої науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 15-16 листопада 2017).* Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 30-31.

6 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Ремонт насосних штанг після експлуатації. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2019: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 26 – 28 березня 2019).* Дніпро: Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний

університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. Дніпро: НМетАУ, 2019. С.12.

7 Богдан Копей, Василь Михайлюк, Андрій Стефанишин, та інш. Дослідження напруженого стану в з'єднанні гібридних насосних штангах. *XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція*, 30 Листопада, 2019р. <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/5266>.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації подано нове рішення науково-технічного завдання, яке полягає у розробці методу та засобів прогнозування та підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями, підвищення їх надійності та забезпечення повного використання закладеного в них ресурсу.

Основні результати полягають в наступному:

1. Проаналізовано причини виникнення дефектів в насосних штангах, виконано порівняльний аналіз обривів в НГВУ, ВНГ, БНГ та в умовах Пермського басейну США та показано, що кількісні показники аварійності практично співпадають, а різниця не перевищує 10%.

2. Досліджено ріст коротких тріщин втоми в насосних штангах, методи їх вирощування та гальмування та визначено границю втоми сталі насосних штанг з короткими тріщинами. Аналітично обґрунтовані, в доповнення до вже відомих, додаткові істотні причини руйнування насосних штанг, що експлуатуються в нафтових свердловинах та досліджено вплив напружень кручення в насосних штангах при складному напруженому стані та показано, що вони на 5% зменшують довговічність штанг в діапазоні $M_{кр} = 50-250$ Нм та на 50% зменшують критичну довжину тріщин.

3. Вдосконалено технологію гальмування росту коротких тріщин нанесенням захисного покриття, що виконує не тільки функцію протикорозійного захисту, але і механічно зміцнює поверхню насосної штаги. Результати експериментів свідчать, що запропонований метод відновлення штанг забезпечує зростання обмеженої границі витривалості зразків згідно запропонованої технології відновлення штанг в 3-4 рази. Вперше встановлено, що нанесення склопластикового бандажа на гібридні штанги з втомними тріщинами подовжує їх ресурс на 15-20 %.

4. Проаналізовано технологічні процеси ремонту насосних штанг та розроблено методи прогнозування їх експлуатаційних можливостей. За допомогою комп'ютерної програми *MathCAD* та побудованих повних діаграм

втомного руйнування на основі кривих корозійної втоми сталевих та композитних насосних штанг, можна з будь-якою ймовірністю визначати довговічність штанг при дії змінного навантаження та прогнозувати ресурс насосних штанг як сталевих, так і композитних та обґрунтувати періодичність проведення їх дефектоскопії, що дозволить раціонально використовувати штанги і значно скоротити аварійність при видобуванні нафти зі свердловин.

5. Отримано подальший розвиток метод відновлення насосних штанг, який полягає в проточуванні та зміцненні поверхні штанги поздовжнім навантаженням і крученням з розробленими режимами, що забезпечує однорідність деформування по її довжині, як наслідок відновлення первісної геометрії, підвищення втомної міцності матеріалу та підвищення обмеженої границі корозійної втоми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі* : Тези доповідей науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. С.118-220.

2 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Аналіз методів відновлення відбракованих насосних штанг. *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012*: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Івано-Франківськ, 5-7 листопада 2012). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. С.130 – 132.

3 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І., Онищук О.О. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя*: Збірник доповідей учасників сімнадцятої Всеукраїнської науково-практичної конференції (Запоріжжя, 22-26 жовтня 2012). Запоріжжя: Видавництво ПГА, 2012. С. 124-134.

4 Копей Б.В., Копей В.Б., Мартинець О.Р., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової насосної установки. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2 (47). С. 62-71.

5 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 1(34). С.120-125.

6 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Аналіз способів ремонту насосних штанг. *Нафтогазова енергетика – 2013*: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. С.134-136.

7 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Овецький С. О., Стефанишин А.Б. Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг . *Современные*

проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2013: Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции (Одесса, 18-29 июня 2013). Выпуск 2, том 7. Одесса: Куприенко, 2013. С. 78-84. (Index Copernicus)

8 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Склад і властивості асфальтосмолистих речовин. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 2 (51). С.45-50.

9 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Контроль мікроструктури насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Тези доповідей 7-ої науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 19-20 листопада 2019)*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. С. 113-114.

10 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Аналіз критеріїв Гудмана, Зодерберга і Гербера та розрахунків втомної міцності насосних штанг. *Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції (Дрогобич, 03 березня 2017)*. Дрогобич, 2017. С. 65-68.

11 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017)*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С.135-136.

12 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Втомна міцність гібридних насосних штанг при циклічному розтязі та згині. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017)*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С.121-122.

13 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Порівняльний аналіз поломок насосних штанг в різних регіонах. *Нафтогазова енергетика 2017: Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ,*

15-19 травня 2017). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С. 117-118.

14 Богдан Копей, Василь Михайлюк, Андрій Стефанишин, та інш. Дослідження напруженого стану в з'єднанні гібридних насосних штангах. *XI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція*, 30 Листопада, 2019р. <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/5266>.

15 B.V. Kopei, A.B.Stefanyshyn, and T.P. Venhrynyuk. Fatigue strength of hybrid pump rods. *Material Science*. Vol.54.No.5 March 2019, P. 739-742. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00240-z> (Scopus)

16 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Рачкевич І.О. Розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги. *Розвідка і розробка нафтогазових родовищ*. 2017. №3(64). С. 50-56.

17 Копей Б.В., Блажків Т.Б., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Контроль руйнування та росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Тези доповідей 6-ої науково-практичної конференції* (Івано-Франківськ, 15-16 листопада 2017). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2017. С. 30-31.

18 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. *Розвідка і розробка нафтогазових родовищ*. 2017. №4(65). С. 20-25.

19 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг. *Нафтогазова енергетика*. 2017. № 2(28). С. 27-30.

20 Б. В. Копей, А. Б. Стефанишин, Т. П. Венгринюк. Втомна міцність гібридних насосних штанг. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. № 4. С. 117-122.

21 Стефанишин А.Б., Бакун Б.М., Копей Б.В. Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення. *Молодь: наука та інновації: Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених* (Дніпро, 15-16 листопада 2018). Дніпро: НМетАУ, 2018. С. 45-46.

22 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Відновлення властивостей дослідних зразків насосних штанг після експлуатації. *Сучасний рух науки: тези доп. V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції* (Дніпро, 7-8 лютого 2019). Дніпро: НМетАУ, 2019. С. 335-338.

23 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Ремонт насосних штанг після експлуатації. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2019: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції* (Дніпро, 26 – 28 березня 2019). Дніпро: НМетАУ, 2019. С. 12.

24 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б., Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

25 Копей Б.В., Копей В.Б., Копей І.Б. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти: монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. 406с.

26 Копей Б.В., Стеліга І.І., Копей В.Б. Методи прогнозування ресурсу насосних штанг. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1999. №36, С. 24-59.

27 Копей Б.В., Зінченко Ю.С., Копей В.Б. Аналіз поломок насосних штанг в промислових умовах. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2008. № 2(18), С. 49-56.

28 Clayton T. Hendricks, Russell D. Stevens. Suckerrod failure analysis. Special report from Norris. Tulsa, 2005. P. 15.

29 Zhanyu Ge. Statistical analysis of sucker rod pumping failures in the Permian basin, B.S.E., M.S.E. a thesis in Petroleum Engineering May, 1998. P. 156.

30 Копей Б.В. Розрахунок, монтаж і експлуатація бурового обладнання: підручник для студентів нафтових вузів. Івано-Франківськ: Факел, 2001. 446 с.

31 A.V.Stefanyshyn. Restoration of hybrid sucker rods technical characteristics. *Modern engineering and innovative technologies*. 2020. Issue №11, Part 1, March. P. 22-26. (Index Copernicus)

32 Ратич Л.В., Федорович Я.Т. Циклическая коррозионная трещиностойкость материалов и долговечность насосных штанг. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1988. №6. С. 95-100.

33 Канарчук В.Є., Канарчук В.Є., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин. Київ: Либідь, 2003. 260 с.

34 Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Власенко В.Д., Уланов В.А. Методы повышения долговечности деталей машин. Москва: Машиностроение, 1971. 272 с.

35 Елизаветин М.А. Повышение надежности машин. Москва: Машиностроение, 1973. 430 с.

36 Грешников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. Москва : Изд-во стандартов, 1976. 272 с.

37 Бунина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. Ленинград: ЛГУ, 1990. 156 с.

38 Ермолов И. Н., Алешин Н.П., Потапов А.И. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля.: практическое пособие. Москва: Высшая школа, 1991. 283 с.

39 Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. Москва: Машиностроение, 1985. 152 с.

40 Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. Москва: Машиностроение, 1968. 196 с.

41 Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Власенко В.Д., Уланов В.А. Методы повышения долговечности деталей машин. Москва: Машиностроение, 1971. 272 с.

42 Копей Б.В., Лопатін В.В., Копей І.Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2003. №1(6). С. 129-133.

43 Уманский В.Б., Маняк Л.К. Новые способы упрочнения деталей машин: справочник. Донецк: Донбас, 1990. 144 с.

44 Мкачтрян С.М., Пичугин В.Ф. Повышение износостойкости бурового и нефтепромыслового оборудования и инструмента на основе использования эффекта избирательного переноса. Москва: ВНИИОЭНГ, 1980. С. 1-32.

45 Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений: учебное пособие. Москва: Издательство стандартов, 1991. 175 с.

46 Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. Москва: Машиностроение, 1984. 312 с.

47 Мирзаджанзаде А. Х., Степанова Г. С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. Москва: Недра, 1977. 229 с.

48 Чкалова О.Н. Основы научных исследований. Київ: Вища школа, 1978. 120 с.

49 Сиденко В.М., Грушко И.М. Основы научных исследований. Харків: Вища школа, 1979. 200 с.

50 Белый И.В., Власов К.П., Клепиков В.Б. Основы научных исследований и технического творчества. Харків: Вища школа, 1989. 200 с.

51 Довідник здобувача наукового ступеня. Київ: Редакція «Бюлетеня Вищої атестаційної комісії України», 2000. 64 с.

52 Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Власенко В.Д., Уланов В.А. Методы повышения долговечности деталей машин. Москва: Машиностроение, 1971. 272 с.

53 Муравьев В. М. Справочник мастера по добыче нефти: изд. 3, перераб. и доп. Москва: Недра, 1974. 264 с.

54 Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. Київ: Либідь, 2002. 328 с.

55 Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва: Мир, 1977. 552 с.

56 Ботвина Л.Р., Маслов Л.И., Гуревич С.Е.К вопросу о природе разрыва кривых усталости: Усталость и вязкость разрушения металлов. Москва: Наука, 1974. 282с.

57 Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. Київ: Наукова думка, 1971. 268 с.

58 Вакуленко И.А., Большаков В.И. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали: монография. Днепропетровск: Изд-во Днепропетровского нац. университета ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2007. 191 с.

59 Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94. - [Чинний від 2005-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 1995. 92 с.

61 Васильев А. Книга Mathcad 13 на примерах. Петербург: ВНУ, 2007. 528 с.

62 Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 279с.

63 Бабаев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. Москва: Недра, 1987. 264с.

64 Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Metallurgy, 1988. 400 с.

65 Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. Москва: Metallurgy, 1975. 456 с.

66 Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. Москва: Metallurgy, 1976. 456 с.

67 Шанявский А.А. Ротационная неустойчивость деформации и разрушения металлов при распространении усталостных трещин на мезоскопическом масштабном уровне. I. Процессы пластической деформации в вершине трещины. II. Механизмы разрушения. *Физическая мезомеханика*. 2001. № 1. С. 73-95.

68 Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. Структурные уровни деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990. 255 с.

69 Панин В.Е., Фомин В.М., Титов В.М. и др. Физические процессы на границах раздела при получении гетерогенных материалов и покрытий: сборник статей по интеграционным программам фундаментальных исследований СО

РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 343-356.

70 Тушинский Л.И., Плохов А.В., Столбов А.А., Синдеев В.И. Конструктивная прочность композиции «основной металл - покрытие». Новосибирск: Наука, 1996. 296 с.

71 Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. Київ: Наукова думка, 1983. 264 с.

72 Калмуцкий В.С. Критерии усталостного разрушения деталей с покрытиями. *Проблемы прочности*. 1983. № 12. С. 7-10.

73 Круман Б.Б. Глубиннонасосные штанги. Москва: Недра, 1977. 181 с.

74 Панасюк В.В., Ратич Л.В., Дмытрах И.Н. К вопросу определения электрохимического состояния в развивающейся трещине при исследовании трещиностойкости материала в коррозионной среде. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 1982. №3. С. 42-49.

75 РД 50 -345- 82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Москва: Изд-во стандартов, 1983. 96 с

75 Окрушко Е.И., Ураксеев М.А. Дефектоскопия глубиннонасосных штанг. Москва: Недра, 1983. 112 с.

76 Федорович Я.Т., Сичов Ю.С., Семенов В.В. Оцінка впливу експлуатаційних дефектів на опір втомі насосних штанг *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 1994. №31. С. 62-67.

77 Новиков В.Ф., Семенов В.В., Бахарев М.С. О возможности неразрушающего определения предела выносливости стали 20Н2М. *Дефектоскопия*. 2006. № 3. С. 65-71

78 Семенов В.В. Механическая очистка рабочих поверхностей внутрискважинного оборудования для предупреждения осложнений при добыче нефти. *Нефтепромысловое дело*. 2008. № 10. С. 48-52.

79 Семенов В.В., Пепеляев В.В. Работоспособность штанг насосных во взаимосвязи со структурой материала длинномерного изделия. *Нефтепромысловое дело*. 2008. № 12. С. 37-45.

80 Молчанов А.Г., Чичеров Л.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы. Москва: Недра, 1983. 308 с.

81 2 Чичеров Л.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы: учебное пособие для вузов. Москва: Недра, 1983. 312 с.

82 4 Нелюбов Д. В., Важенин Д. А., Петелин А. Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения Аганского месторождения/ *Нефтехимия*. 2011. № 6. С. 43-48.

83 Агаев С. Г., Гребнев А. Н. Влияние физико-химических свойств асфальто-смолопарафиновых отложений (АСПО) на парафинизацию скважин *Нефть и Газ Западной Сибири: Материалы всероссийской научно-технической конференции*. 2009. 392 с.

84 Шарифуллин А.В., Байбекова Л.Р., Сулейманов А.Т. Особенности состава и строения нефтяных отложений. *Технологии нефти и газа*. 2006. №6. С.19-24.

85 Шарифуллин А.В., Байбекова Л.Р., Хамидуллин Р.Ф. Состав и структура асфальтено-смоло-парафиновых отложений Татарстана. *Технологии нефти и газа*. 2006. №4. С. 34-41.

86 Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. Москва: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. 653 с.

87 Сергиенко С.Р., Таимова Б.А., Таталаев Е.И. Высокомолекулярные неуглеводородные соединения нефти. Москва: Наука, 1959. 412 с.

88 Середницький Я., Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті. Львів: ФМІ НАНУ, 1999. 240 с.

89 G.A. Mansoori. Paraffin/Wax and Waxy Crude Oil. The Role of Temperature on Heavy Organics Deposition from Petroleum Fluids. UIC/TRL Heavy

Organics Deposition home page. URL: [http://www.uic.edu/~mansoori/Wax and Waxy Crude.html](http://www.uic.edu/~mansoori/Wax%20and%20Waxy%20Crude.html)

90 Тронов В.П. Механизм образования смолопарафиновых отложений и борьба с ними. Москва: Недра, 1970. 192 с.

91 Марьин В.И., Акчурин В.А., Демахин А.Г. Химические методы удаления и предотвращения образования АСПВ при добыче нефти: аналитический обзор. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2001. 156 с.

92 ГОСТ 13877-96. Межгосударственный стандарт. Штанги насосные и муфты штанговые. Технические условия. Киев: Госстандарт Украины, 2002. 28 с.

93 Фаерман И.Л. Штанги для глубинных насосов. Баку: Азнефтеиздат, 1955. 323 с.

94 Y.A. Dzenis, Cycle based analysis of damage and failure in advanced composites under fatigue. Experimental observation of damage development within loading cycles, *Int J Fatigue*, 25(2003), P. 499–510.

95 Омельченко С.И., Кадурин Т.М. Модифицированные полиуретаны. Київ: Наукова думка, 1983. 238 с.

96 Leidheizer H. Mechanism of corrosion inhibition with special attention to inhibitors in organic coatings. *Journal of Coatings Technology*. 1981. №53. P. 29–39.

97 Kitagawa H, Takahashi S. Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stages. In *Proceedings of the Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials*. Metals Park, OH: American Society for Metals; 1976. P. 627–631

98 Журков С.Н., Куксенко В.С., Слуцкер А.И. Образование субмикроскопических трещин в полимерах под нагрузкой. *Физика твердого тела*. 1969. № 11. С. 296 – 301.

99 Лебедев, А.А., Ламашевский А.А. Исследование деформирования и разрушение углеродистой стали при плоском напряженном состоянии.

Термопрочность материалов и конструктивных элементов. 1969. №.5. С. 444-456.

100 Писаренко, Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 415 с.

101 Саврук М.П. Механика разрушения и прочность материалов. Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. Киев: Наукова думка, 1988. 620 с.

102 Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Москва: Мир, 1990.

103 ГОСТ 25.506 - 85 Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. Москва: Издание официальное, 1985. 61 с.

104 <http://www.compositesworld.com/articles/market-outlook-surplus-in-carbon-fibers-future>

105 <http://www.edmunds.com/car-news/bmw-to-expand-use-of-carbon-fiber-beyond-i-and-m-cars.html>

106 T. Tsukizoe, et. al., Wear Mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber reinforced Plastics, ASME Journal of Lubrication Technology, October, 1977.

107 American Petroleum Institute, API 11B “Specification for Sucker Rods, Polished Rods and Liners, Couplings, Sinker Bars, Polished Rod Clamps, Stuffing Boxes, and Pumping Tees”, 27 th edition, May 2010

108 Морозов Е.М. Расчет на прочность конструкционных элементов с трещинами. Москва: Машиностроение, 1982. 48 с.

109 Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В., Валишин А.А. Разрушение тонких полимерных пленок и волокон. Москва: Химия, 1997. 344 с.

110 Голуб В.П., Погребняк А. Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. Київ: Наукова думка, 1994. 228 с.

111 Голуб В.П., Крижановский В.И. К оценке предельного

состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування.* 1994. № 4. С. 3 - 15.

112 Форрест П. Усталость металлов. Москва: Машиностроение, 1968. 352 с.

113 О.В.Желдубовський, А.Д.Погребняк, М.М.Регульський. Розрахунок граничного стану конструкційних матеріалів при комбінованому навантаженні. *Проблеми тертя і зношування.* 2014. №4 (65). С. 136-148.

114 В.Т. Трощенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский и др. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие, часть 2. Київ: Наукова думка, 1994. 704 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Підвищення ефективності нафтогазопромислового обладнання: монографія. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. 375с.

2 B.V. Kopei, A.V.Stefanyshyn, and T.P. Venhrynyuk. Fatigue strength of hybrid pump rods. Material Science. Vol. 54. No. 5 March 2019. P. 739-742. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00240-z> (Scopus)

3 A.V.Stefanyshyn. Restoration of hybrid sucker rods technical characteristics. Modern engineering and innovative technologies. Issue №11, Part 1, March 2020. P. 22-26. (Index Copernicus)

4 Б. В. Копей, А. Б. Стефанишин, Т. П. Венгринюк. Втомна міцність гібридних насосних штанг. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2018. № 4. С.117-122.

5 Копей Б.В., Копей В.Б., Мартинець О.Р., Стефанишин О.І., Стефанишин А.Б. Використання «дерева відмов» як методу структурного аналізу штангової насосної установки. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 2 (47). С.62-71.

6 Копей Б.В., Стефанишин О.І., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Використання поліуретанових покриттів в процесі ремонту насосних штанг. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2013. № 1(34). С.120-125.

7 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Склад і властивості асфальтосмолистих речовин. Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 2 (51). С.45-50.

8 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Рачкевич І.О. Розрахунок залишкового ресурсу насосної штанги. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №3(64) . С.50-56.

9 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Розвідка і розробка нафтогазових родовищ. 2017. №4(65). С.20-25.

10 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг. *Нафтогазова енергетика*. 2017. № 2(28). С.27-30.

Опубліковані праці апробаційного характеру

11 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Овецький С. О., Стефанишин А.Б. Технологічні процеси та технічні засоби ремонту насосних штанг. *Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2013*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 18-29 июня 2013 г. Одесса: Куприенко, 2013. Выпуск 2, том 7. С.78-84. (Index Copernicus)

12 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі*: тези доповідей науково-технічної конференції, 3-6 жовтня 2012 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. С.118-220.

13 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Аналіз методів відновлення відбракованих насосних штанг. *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012*: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, 5-7 листопада 2012 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. С.130 – 132.

14 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О. І., Онищук О.О. Вдосконалення технології ремонту насосних штанг. *Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя*: матеріали доповідей учасників сімнадцятої Всеукраїнської науково-практичної конференції, 22-26 жовтня 2012 р. Запоріжжя: Видавництво ПГА, 2012. С. 124-134.

15 Копей Б.В., Мартинець О.Р., Стефанишин А.Б. Аналіз способів ремонту насосних штанг. *Нафтогазова енергетика – 2013*: тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, 7-11 жовтня 2013 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2013. С. 134-136.

16 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Аналіз критеріїв Гудмана, Зодерберга і Гербера та розрахунок втомної міцності насосних штанг. *Нафта і газ. Наука-освіта-виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку*: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, 02-03 березня 2017 р. Дрогобич. С. 65-68.

17 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Стефанишин О.І. Відновлення технічних характеристик насосних штанг з експлуатаційними дефектами. *Нафтогазова енергетика 2017*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С.135-136.

18 Копей Б.В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Втомна міцність гібридних насосних штанг при циклічному розтязі та згині. *Нафтогазова енергетика 2017*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ, 15-19 травня 2017р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 121-122.

19 Копей Б.В., Стефанишин А.Б., Мартинець О.Р. Порівняльний аналіз поломок насосних штанг в різних регіонах. *Нафтогазова енергетика 2017*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 117-118.

20 Копей Б.В., Блажків Т.Б., Юй Шуанжуй, Стефанишин А.Б. Контроль руйнування та росту втомних тріщин в гібридних насосних штангах. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання*: тези доповідей 6-ої науково-практичної конференції, 15-16 листопада 2017 р. Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2017. С. 30-31.

21 Стефанишин А.Б., Бакун Б.М., Копей Б.В. Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків насосних штанг після відновлення. *Молодь: наука та інновації*: матеріали шостої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених, 15-16 листопада 2018 р. Дніпро, 2018. С. 45-46.

22 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Відновлення властивостей дослідних зразків насосних штанг після експлуатації. *Сучасний рух науки: тези доп. V міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 7-8 лютого 2019 р.* Дніпро, 2019. С.335-338.

23 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Ремонт насосних штанг після експлуатації. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2019: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 26 – 28 березня 2019 р.* Дніпро: Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. Дніпро: НМетАУ, 2019. С.12.

24 Копей Б.В., Стефанишин А.Б. Контроль мікроструктури насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: тези доповідей 7-ої науково-практичної конференції, 19-20 листопада 2019 р.* Івано-Франківськ: Ів.-Фр. нац. техн. ун-т нафти і газу. 2019. С.113-114.

25 Богдан Копей, Василь Михайлюк, Андрій Стефанишин, та інш. Дослідження напруженого стану в з'єднанні гібридних насосних штангах. *XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 30 Листопада, 2019р.* <http://conferences.neasmo.org.ua/uk/art/5266>.

Додаток Б

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖЕНО



Головний інженер БЦБВО

Кавич А.Г.

«19» жовтня 2019 р.

АКТ

впровадження та виготовлення дослідної партії насосних штанг після ремонту

В умовах Бориславської ЦБВО підготовлена дослідна партія відновлених штанг за розробленою технологією ТОВ «ТАКТ» та ІФНТУНГ і передана для подальшого їх випробування на свердловинах ПАТ «Укрнафта». Пропонується технологія ремонту відпрацьованих насосних штанг (НШ), яка включає наступні операції:

1. Вхідний контроль відпрацьованих НШ, які надійшли на ремонт, по твердості, який включає в себе - заміри твердості за Бринелем НВ і сортування відпрацьованих НШ з $HV \leq 240$ і з $HV \geq 240$.
2. Сортування НШ за овальністю (механічному стиранню) в одному перерізі.
3. Відрізання висаджених головок, без залишку галтелі, на заготовці до номінального діаметра. Косина різу не більше 0,5 мм.
4. Механічна очистка відпрацьованих НШ на лінії дробоструминного очищення гарячекатаного прокату в 3-5 проходів до повного очищення поверхні прутків.
5. Зняття фасок $3 \times 30^\circ$ з обох кінців заготовки на фаскознімальній машині;
6. Виправлення заготовок на 2-х валковій косовалковій правильній машині. Кривизна прутків після правки не більше 1 мм / 1 м.
7. Обточування на безцентровому токарному верстаті відпрацьованих НШ діаметром 25 мм до 22,06 - 22,03 мм, відповідно до ГОСТ 13877-96, відпрацьованих НШ діаметром 22 мм до 19,05 - 19,02 мм, відповідно до ГОСТ 13877-96. Чистота поверхні після проточування складає Ra 0,63.
8. Сортування готової продукції за діаметрами на відповідність ГОСТ 13877-96.
9. Промаслення заготовки НШ інгібітором атмосферної корозії.
10. Видача сертифіката якості на вироблену заготовку НШ.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, приведені в дисертаційній роботі Стефанишина Андрія Богдановича «Прогнозування та підвищення ресурсу насосних штанг з експлуатаційними пошкодженнями», використовується для впровадження технології відновлення насосних штанг, що забезпечує зростання обмеженої границі їх витривалості в 3-4 рази. За допомогою отриманих результатів досліджень можна прогнозувати ресурс насосних штанг та обґрунтувати періодичність проведення їх дефектоскопії, що дозволить раціонально використовувати штанги і значно скоротити аварійність при видобуванні нафти зі свердловин.

Доктор технічних наук, професор, ІФНТУНГ

Копей Б.В.

Інженер-технолог БЦБВО

Стефанишин О.І.

Аспірант ІФНТУНГ

Стефанишин А.Б.