

Машини нафтової та газової промисловості

УДК 622.2

DOI: 10.31471/2304-7399-2026-22(83)-234-247

ВПЛИВ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ЗМІНИ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

В. І. Артим¹ *, Б. А. Новосельський¹ , І. О. Ластівка² 

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
e-mail: volodymyr.artym@nung.edu.ua

²Державний університет «Київський авіаційний інститут»;
03058, просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна
e-mail: ivan.lastivka@npp.kai.edu.ua

У статті представлено результати дослідження впливу ускладнених умов експлуатації на зміни механічних властивостей сталей елементів бурильної колони. Метою роботи є експериментальне визначення фактичних властивостей матеріалів елементів бурильної колони та їх аналіз після тривалої експлуатації під дією робочих середовищ та інших експлуатаційних чинників. Встановлено, що експлуатація елементів бурильної колони в умовах комплексної дії механічних навантажень, підвищених температур і водневмісного середовища призводить до інтенсивного наводнювання сталей (зростання S_H у 4-7 разів), причому підвищена температура додатково інтенсифікує дифузію та накопичення водню у сталі.

Виявлено, що при незначній зміні характеристик міцності (до 3-5%) під впливом температури та наводнювання відбувається зниження ударної в'язкості (на 5-15%), що свідчить про підвищену чутливість характеристик опору руйнуванню до комбінованої дії цих чинників.

Встановлено наявність кореляційного зв'язку між концентрацією водню та зниженням KCV, при цьому підвищена температура посилює прояви водневого окрихчення, особливо у високоміцних сталях із загар-

товано-відпущеною структурою (зокрема 30ХГСА). Отримані результати можуть бути використані для оцінки залишкового ресурсу елементів бурильної колони.

Ключові слова: бурильна колона, бурильна труба, бурильний замок, замкове різьбове з'єднання, механічні характеристики, температура, деградація властивостей, залишковий ресурс.

Вступ. Елементи бурильної колони працюють у складних експлуатаційних умовах, за яких вони піддаються одночасній дії значних механічних навантажень, підвищених температур та робочого водневомісного середовища. Такий комплекс чинників призводить до накопичення дефектів у сталі, деградації матеріалу та зниження експлуатаційної надійності елементів бурильної колони.

Під впливом підвищених температур і робочих навантажень спостерігається зниження характеристик міцності та пластичності (границі міцності, умовної границі плинності, відносного видовження та відносного звуження), а також тріщиностійкості. Такі зміни безпосередньо впливають на залишковий ресурс елементів бурильної колони та визначають умови безпечної експлуатації.

Отже, робота елементів бурильної колони у середовищі підвищених температур, механічних навантажень і водневомісного робочого середовища спричиняє комплексні зміни механічних властивостей і тріщиностійкості сталей. Ці чинники необхідно враховувати при оцінці технічного стану труб та побудові моделей прогнозування залишкового ресурсу елементів бурильної колони.

Наукова та практична цінність. Встановлено закономірності зміни механічних властивостей сталей елементів бурильної колони після тривалої експлуатації в ускладнених умовах. Отримані результати можуть бути використані для оцінки залишкового ресурсу елементів бурильної колони.

Формування мети статті. Метою роботи є експериментальне визначення фактичних властивостей матеріалів елементів бурильної колони та їх аналіз після тривалої експлуатації під дією робочих середовищ та інших експлуатаційних чинників.

З огляду на зазначену мету дослідження, особливого значення набуває аналіз сучасних наукових підходів до оцінювання впливу експлуатаційних чинників на механічні властивості сталей бурильних труб. Узагальнення результатів вітчизняних і зарубіжних досліджень дозволяє визначити основні закономірності деградаційних процесів, пов'язаних із дією температури, механічних навантажень та водневомісних середовищ, а також окреслити напрями подальших експериментальних досліджень.

Аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень і публікацій

Механічні властивості бурильних труб значною мірою залежать від температури експлуатації. Підвищені температури, характерні для глибоких пластів, впливають на міцність, пластичність та тріщиностійкість сталей, пришвидшуючи розвиток деформацій і підсилюючи вплив водню у металі. Це призводить до підвищеного ризику зародження і поширення втомних тріщин під час тривалих циклічних навантажень [1, 3, 7].

Одним із ключових чинників деградації сталей елементів бурильної колони в ускладнених умовах експлуатації є їх наводнювання, яке відбувається внаслідок взаємодії металу з робочими середовищами під час буріння. Джерелами водню є бурові розчини, пластові води та корозійні процеси, що зумовлюють електрохімічне виділення водню на поверхні металу. За умов підвищених температур, значних механічних напружень і тривалого контакту з агресивними середовищами інтенсифікуються процеси дифузії водню в об'єм сталі та його накопичення в дефектних зонах мікроструктури [1, 2, 5, 8].

Водень, проникаючи в метал, локалізується в областях з підвищеною енергією – на межах зерен, у дислокаційних скупченнях, мікропорах, вклученнях та інших структурних неоднорідностях. Така локалізація призводить до зниження когезійної міцності матеріалу, ослаблення міжатомних зв'язків і формування умов для ініціювання мікропошкоджень. У результаті під дією зовнішніх навантажень полегшується зародження мікротріщин та їх подальше злиття у макроскопічні дефекти, що визначають характер руйнування матеріалу [2, 4, 5, 8].

Водневе окрихчення є процесом деградації металу, зумовленим проникненням і накопиченням водню в його структурі, що призводить до зниження міжатомної взаємодії та зміни механізмів деформації і руйнування. У результаті цього зменшуються пластичність і в'язкість руйнування матеріалу (зокрема показники δ та ψ), знижується опір пластичній деформації та зменшується здатність матеріалу до енергоємного руйнування. Одночасно з цим знижуються параметри тріщиностійкості, зокрема коефіцієнт інтенсивності напружень і J-інтеграл, що характеризують опір матеріалу поширенню тріщин. Водень сприяє локалізації пластичної деформації та ініціюванню мікротріщин, що призводить до переходу від в'язкого до крихкого або квазікрихкого механізму руйнування [2, 4, 7, 8].

Особливістю наводнювання сталей у реальних умовах експлуатації є його розвиток за умов поєднаної дії циклічних навантажень, підвищених температур і робочого середовища. Це сприяє не лише інтенсифікації накопичення водню, а й зміні кінетики росту тріщин, зокрема збільшенню швидкості їх поширення. Найчутливішими до наводнювання є високоміцні сталі із загартовано-відпущеною структурою, у яких водень

ефективніше концентрується в дефектних зонах мікроструктури [2-5, 7, 8, 9, 10].

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що поєднана дія підвищених температур, механічних навантажень і водневовмісного середовища є визначальним чинником деградації механічних властивостей сталей елементів бурильної колони. Встановлені закономірності вказують на необхідність експериментального дослідження реальних матеріалів після тривалої експлуатації для уточнення характеру змін їх властивостей і тріщиностійкості. Це зумовило вибір об'єктів і методик дослідження, які наведено нижче.

Об'єкти та методики досліджень. Досліджували елементи бурильної колони групи міцності «Л» після тривалої експлуатації (понад 10000 год роботи): бурильні труби із зовнішнім діаметром 73 мм і товщиною стінки 9 мм зі сталі 36Г2С у гарячекатаному стані (структура — ферито-перлітна), а також елементи замкових різьбових з'єднань: NC 26, виготовлене зі сталі 30ХГСА, та NC 50, виготовлене зі сталі 45ХГМА після гартування і високого відпуску (структура – відпущений мартенсит, сорбіт відпуску).

Методика визначення концентрації водню у сталях

Для визначення об'ємної концентрації водню у сталях використовували аналізатор дифузійно-рухомого і залишкового водню LECO DH603 (рис. 1).



Рис. 1. Аналізатор дифузійно-рухомого і залишкового водню LECO DH603

Принцип роботи аналізатора [11] ґрунтується на вимірюванні зміни теплопровідності потоків робочого та еталонного газу. Комірка теплопровідності складається з двох з'єднаних філаментів, занурених у відповідні потоки. Філаменти нагріваються до температури, вищої за температуру термостата. Як газ-носії використовують азот високого ступеня очищення.

За наявності чистого азоту навколо обох філаментів сигнал дорівнює нулю. Відхилення складу робочого потоку, спричинене виділенням водню зі зразка, призводить до появи електричного сигналу на виході комірки. Мінімальна визначувана концентрація водню становить $C_{\text{H}}^{\text{min}} \cong 0,1 \text{ ppm}$. Нижчі концентрації можуть бути визначені після додаткового калібрування.

Температура екстракції водню є сталою і становить 1100 °С. Час аналізу τ — не менше 200 с; фактична тривалість (200–500 с) залежить від досягнення критерію завершення вимірювання – зниження інтенсивності сигналу до рівня менше 1 % від максимального значення.

Усі зразки мали однакову масу та геометрію та проходили однаково підготовку (знежирення та сушіння) для запобігання спотворенню результатів через поверхневі забруднення.

Методики визначення механічних властивостей і тріщиностійкості сталей:

а) Випробування на розтяг за кімнатної та підвищених температур

Механічні характеристики сталей визначали шляхом випробувань на одноосьовий розтяг згідно з ДСТУ ISO 6892-1:2019 [12] (за кімнатної температури) та ДСТУ EN 10002-5:2006 [13] (за підвищених температур).

Випробування на розтяг за кімнатної температури

Визначали границю міцності, умовну границю плинності, відносне видовження після розриву та відносне звуження.

Випробування проводили на пропорційних циліндричних зразках із круглим поперечним перерізом (рис. 2), виготовлених із матеріалів бурильної колони та різьбових з'єднань. Геометричні параметри відповідали вимогам стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019.

Випробувальне обладнання відповідало вимогам ДСТУ ISO 7500-1. Навантаження прикладали вздовж осі зразка із забезпеченням співвідношення. Швидкість деформації становила 2 мм/хв відповідно до стандарту.

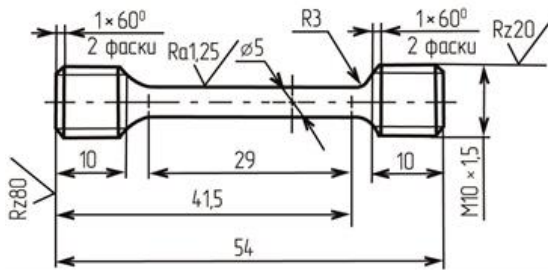


Рис. 2. Геометричні параметри та загальний вигляд зразків для випробувань на розтяг

Випробування за підвищених температур

Проводили з використанням високотемпературної печі, інтегрованої у випробувальну машину. Зразки нагрівали до заданої температури з витримкою до встановлення температурної рівноваги по всьому об'єму.

Температуру контролювали термопарами, закріпленими на робочій частині зразка. Після стабілізації температури виконували випробування за аналогічною схемою.

б) Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ISO 148-1 [14] із використанням зразків із V-подібним надрізом.

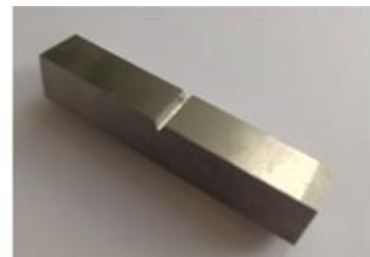
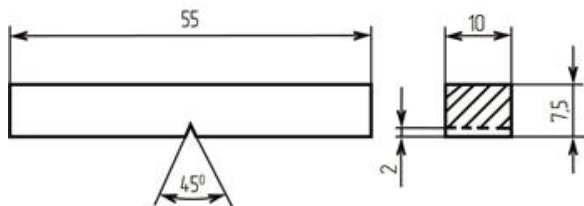


Рис. 3. Геометричні параметри та загальний вигляд зразків на ударний вигин за Шарпі

Випробування проводили на прямокутних зразках із надрізом у центрі. Через обмеження геометрії ($D \times t = 73 \times 9$ мм) застосовували зменшені зразки. Для кожного типу елементів випробовували не менше п'яти зразків.

Випробування за кімнатної температури

Поглинуту енергію руйнування KCV визначали за стандартною методикою:

$$KCV = E, \quad (1)$$

де E – енергія, поглинута зразком.

Результати для зменшених зразків перераховували до повнорозмірних:

$$KCV_{std} = \alpha \times KCV, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт перерахунку, що враховує геометрію зразка.

Випробування за підвищених температур

Зразки нагрівали у печі або термостаті до заданої температури з витримкою для забезпечення рівномірного температурного поля. Температуру контролювали термопарами.

Випробування виконували максимально швидко після вилучення зразка для мінімізації тепловтрат. Перенесення здійснювали за допомогою спеціальних пристроїв.

Після проведення експериментальних досліджень відповідно до описаних методик було отримано результати, які дозволяють оцінити вплив умов тривалої експлуатації на структурний стан та механічні властивості сталей елементів бурильної колони. Їх аналіз наведено нижче.

Основний матеріал і результати

Наводнювання сталей в ускладнених умовах експлуатації

Для кількісної оцінки ступеня наводнювання сталей визначали концентрацію водню у металі в стані поставки та після тривалої експлуатації. Порівняння цих значень дозволяє оцінити інтенсивність деградаційних процесів і встановити зв'язок між накопиченням водню та зміною механічних властивостей матеріалу. Отримані значення наведено в табл. 1.

Результати вимірювань отримано як середнє значення п'яти незалежних визначень для кожного типу зразків із наведенням середньоквадратичної похибки вимірювання. Усі зразки мали близьку масу та однакову геометрію, а також проходили ідентичну підготовку перед випробуванням (знежирення та просушування), що забезпечувало мінімізацію систематичних похибок, пов'язаних із впливом поверхневих забруднень і нестабільністю умов вимірювання.

Отримані результати (див. табл. 1) свідчать про суттєве зростання концентрації водню C_H після тривалої експлуатації елементів бурильної колони. Для всіх досліджених сталей характерне підвищення концентрації водню C_H у 4-7 разів порівняно зі станом поставки, що узгоджується з літературними даними щодо інтенсифікації наводнювання в умовах дії підвищених температур і робочих навантажень [1, 2, 3, 7].

Аналіз похибок вимірювання свідчить, що відносна невизначеність результатів не перевищує 8-10%, що є характерним для методів визначення дифузійно-рухомого та залишкового водню і підтверджує достовірність отриманих експериментальних даних. Збільшення абсолютної похибки для зразків після експлуатації пов'язане з вищим рівнем вмісту водню та його неоднорідним розподілом у структурі матеріалу.

Таблиця 1. Концентрація водню C_H у сталях елементів бурильної колони групи міцності „Л”

Елемент бурильної колони	Матеріал, стан та структура	Стан матеріалу	Концентрація водню C_H , ppm (середнє значення \pm похибка)
бурильна труба ($\varnothing 73 \times 9$ мм)	сталь 36Г2С, ферито-перлітна структура	стан поставки	$1,0 \pm 0,1$
		після експлуатації	$4,3 \pm 0,4$
елементи замкового різьбового з'єднання ($\varnothing 108 \times 72$ мм) М ($\varnothing 72 \times 55$ мм) Н	сталь 30ХГСА, відпущений мартенсит (сорбіт відпуску)	стан поставки	$0,8 \pm 0,1$
		після експлуатації	$5,2 \pm 0,5$
елементи замкового різьбового з'єднання ($\varnothing 162 \times 110$ мм) М ($\varnothing 110 \times 70$ мм) Н	сталь 45ХГМА, відпущений мартенсит (сорбіт відпуску)	стан поставки	$0,7 \pm 0,1$
		після експлуатації	$5,8 \pm 0,6$

Найбільші значення концентрації водню C_H зафіксовано для сталей 30ХГСА та 45ХГМА, що мають загартовано-відпущену структуру, яка характеризується підвищеною здатністю до локалізації водню в дефектних зонах [7, 8]. Для сталі 36Г2С із ферито-перлітною структурою рівень наводнювання є нижчим, однак його зростання також є суттєвим і впливає на зміну механічних властивостей матеріалу [18].

Збільшення концентрації водню C_H призводить до зниження пластичності та тріщиностійкості сталей, що проявляється у зменшенні здатності матеріалу до пластичної деформації та опору поширенню тріщин. При цьому навіть відносно невелике зростання концентрації водню C_H може викликати непропорційно значне зниження характеристик тріщиностійкості через локалізацію деформації та ініціювання мікротріщин, що узгоджується з сучасними уявленнями про механізми водневого окрихчення [5, 6, 8,].

Таким чином, об'ємна концентрація водню C_H у сталях елементів бурильної колони відображає реальні експлуатаційні умови та є одним із ключових показників деградації матеріалу. Цей параметр необхідно враховувати при оцінці технічного стану елементів і прогнозуванні їх залишкового ресурсу, що підтверджується даними сучасних досліджень [1, 3, 6,7].

Встановлене зростання концентрації водню після тривалої експлуатації зумовлює необхідність оцінки його впливу на механічні властивості сталей. У зв'язку з цим було проведено дослідження характеристик міцності та пластичності досліджуваних матеріалів.

Механічні властивості сталей тривало експлуатованих елементів бурильної колони

Механічні характеристики визначали шляхом одноосьового розтягування відповідно до вимог ДСТУ ISO 6892-1:2019 [12] (за кімнатної температури) та ДСТУ EN 10002-5:2006 [13] (за підвищених температур). Для оцінки впливу підвищеної температури на властивості металу проведено додаткові випробування при температурі 70°C.

Експериментальні результати представлені як усереднені значення п'яти випробуваних зразків для кожного типу матеріалу та умов випробувань, що забезпечує репрезентативність та відтворюваність результатів. Отримані дані (див. табл. 2) узгоджуються з сучасними літературними даними щодо поведінки трубних сталей і сталей елементів замкових різьбових з'єднань під впливом тривалого навантаження, температури та робочого середовища [15-19].

Загалом, після експлуатації спостерігається незначне зниження границі міцності та границі плинності для всіх досліджених сталей. Це явище свідчить про поступове накопичення деформаційних і структурних змін у матеріалі під впливом тривалих механічних навантажень та робочого середовища, що узгоджується з результатами інших досліджень [17, 19].

Випробування зразків при температурі 70°C показали помірне зниження σ_B і σ_T на 2-4%, що узгоджується з [1] про вплив підвищеної температури на міцність сталей. Незважаючи на це, відносне подовження δ та відносне звуження ψ залишаються практично незмінними, демонструючи збереження здатності матеріалу до пластичної деформації навіть після тривалої експлуатації, що узгоджується з [15].

Порівняльний аналіз механічних характеристик показує, що сталь 36Г2С з бурильних труб має найвищу стабільність, тоді як сталь 45ХГМА демонструє найбільше зниження міцності та пластичності під впливом підвищеної температури. Сталь 30ХГСА зберігає проміжну стабільність, що узгоджується з результатами досліджень [16].

**Таблиця 2. Механічні характеристики металу елементів
бурильної колони**

Умови випробувань / джерело	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
<i>Бурильні труби зі сталі 36Г2С</i>				
Сертифікат виробника	865	640	22,5	37,5
Після експлуатації, T випроб. = 20°C	848	632	21,0	37,0
Після експлуатації, T випроб. = 70°C	815	610	20,5	36,5
<i>Замкове різьбове з'єднання зі сталі 30ХГСА</i>				
Сертифікат виробника	771,0	672,0	25,0	42,0
Після експлуатації, T випроб. = 20°C	750,0	661,0	23,0	41,0
Після експлуатації, T випроб. = 70°C	719,0	634,0	22,5	40,5
<i>Замкове різьбове з'єднання зі сталі 45ХГМА</i>				
Сертифікат виробника	758,0	640	14,0	45,0
Після експлуатації, T випроб. = 20°C	720	610	13,0	44,0
Після експлуатації, T випроб. = 70°C	683	580	12,5	43,5

Поряд із характеристиками міцності та пластичності важливим показником експлуатаційної надійності матеріалу є його здатність чинити опір крихкому руйнуванню. У зв'язку з цим проведено дослідження ударної в'язкості сталей після тривалої експлуатації.

***Ударна в'язкість сталей тривало експлуатованих елементів
бурильної колони***

Експериментальні дані свідчать (табл. 3), що після тривалої експлуатації всі досліджувані сталі демонструють зниження ударної в'язкості, яке є найбільш помітним у сталі 45ХГМА, особливо за підвищеної температури. Сталь 30ХГСА зберігає найвищу ударну в'язкість, тоді як сталь 45ХГМА демонструє проміжну стабільність. Зниження KCV при підвищенні температури підтверджує помірний термічний вплив на здатність сталі поглинати ударну енергію, що узгоджується з сучасними дослідженнями щодо впливу експлуатації та водневого середовища на сталі буринних труб та елементи замкових різьбових з'єднань [15–20].

Аналіз отриманого масиву експериментальних даних дозволяє встановити, що зміна величини ударної в'язкості металу досліджуваних фрагментів замкового різьбового з'єднання (ЗРЗ) (30ХГСА) та буринної труби (36Г2С) у досліджуваному діапазоні температур:

при температурі 20°C –

$$\Delta KCV_{BT}^{33} = \frac{\Delta KCV^{33} - \Delta KCV^{BT}}{\Delta KCV^{33}} = \frac{98 - 83}{98} \cdot 100\% = 15,3\% ;$$

при температурі 70°C –

$$\Delta KCV_{BT}^{33} = \frac{\Delta KCV^{33} - \Delta KCV^{BT}}{\Delta KCV^{33}} = \frac{94 - 72}{94} \cdot 100\% = 23,4\%$$

є доволі значною і зі зростанням температури збільшується у 1,53 рази.

Таблиця 3. Ударна в'язкість металів елементів бурильної колони

Умови випробувань / джерело	KCV, Дж/см ²
<i>Бурильна труба зі сталі 36Г2С</i>	
Сертифікат виробника	92,0
Після експлуатації, Т випробування = 20°C	83,0
Після експлуатації, Т випробування = 70°C	72,0
<i>Замкове різьбове з'єднання зі сталі 30ХГСА</i>	
Сертифікат виробника	105
Після експлуатації, Т випробування = 20°C	98
Після експлуатації, Т випробування = 70°C	94
<i>Замкове різьбове з'єднання зі сталі 45ХГМА</i>	
Сертифікат виробника	95
Після експлуатації, Т випробування = 20°C	88
Після експлуатації, Т випробування = 70°C	82

Висновки. Встановлено, що експлуатація елементів бурильної колони в умовах комплексної дії механічних навантажень, підвищених температур і водневовмісного середовища призводить до інтенсивного наводнювання сталей, що проявляється у зростанні концентрації водню C_H у 4-7 разів. Підвищена температура при цьому додатково інтенсифікує процеси дифузії та накопичення водню в металі.

Показано, що за незначного зниження характеристик міцності (до 3–5%) під впливом температури та наводнювання спостерігається суттєвіше зменшення ударної в'язкості (на 5-15%), що свідчить про підвищену чутливість характеристик опору руйнуванню до комбінованої дії цих чинників.

Встановлено наявність кореляційного зв'язку між концентрацією водню та зниженням ударної в'язкості KCV. При цьому підвищена температура посилює прояви водневого окрихчення, особливо у високоміцних сталях із загартовано-відпущеною структурою (зокрема сталі 30ХГСА).

Література

1. Zheng Y., Zhang Y., Sun B., Zhang B., Zhang S., Jin S., Xiao Z., Chu S., Jing Y., Zhang Z. Corrosion Behavior and Mechanical Performance of Drill Pipe Steel in a CO₂/H₂S-Drilling-Fluid Environment // Processes. 2024. Vol. 12, No. 3. Art. 502. DOI: [10.3390/pr12030502](https://doi.org/10.3390/pr12030502).
2. Luo S., Liu M., Shen Y., Lin X. Sulfide Stress Corrosion Cracking Behavior of G105 and S135 High-Strength Drill Pipe Steels in H₂S Environment // Journal of Materials Engineering and Performance. 2019. Vol. 28, No. 3. DOI: [10.1007/S11665-019-03913-7](https://doi.org/10.1007/S11665-019-03913-7).
3. Han L., Liu M., Luo S., Lu T. J. Fatigue and corrosion fatigue behaviors of G105 and S135 high-strength drill pipe steels in air and H₂S environment // Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 124. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.023>.
4. Liu M., Luo S., Shen Y., Lin X. Corrosion fatigue crack propagation behavior of S135 high-strength drill pipe steel in H₂S environment // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 97. P. 493–505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.026>.
5. Corrosion Fatigue Behavior of S135 Drill Pipe Steel in H₂S Environment // Materials for Mechanical Engineering. 2017. Vol. 41, No. 6. P. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.11973/jxgcc1201706011>.
6. Luo S., Liu M., Lin X. Corrosion fatigue behavior of S135 high-strength drill pipe steel in a simulated marine environment // Materials and Corrosion. 2019. Vol. 70. P. 688–697. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201810542>.
7. Huang B., Yang J., Zhang H., Liu G., Chen Y., Li J. Influence of H₂S Corrosion on Rotating Bending Fatigue Properties of S135 Drill Pipe Steel // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1135-5>.
8. Zhong X., He Y., Eliaz N., Campbell K. S., Hu J. Hydrogen effect on phase angle shift in electrochemical impedance spectroscopy during corrosion fatigue crack emanation // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46, No. 80. P. 40175–40184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.205>.
9. О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський, В. В. Тирлич, Грабовська Н.Р. Статистичний аналіз відмов бурильних труб груп міцності S-135. Розробка нафтових та газових родовищ. – 2022. – №1 (82). – С.61-68. DOI: [10.31471/1993-9973-2022-1\(82\)-61-68](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-1(82)-61-68).
10. О. Ю. Витязь, Р. С. Грабовський, В. І. Артим, В. В. Тирлич, Грабовська Н.Р. Чисельно-експериментальна оцінка умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб. Розробка нафтових та газових

родовищ. – 2020. – №2 (75). – С.88-97. DOI: [10.31471/1993-9973-2020-2\(75\)-88-97](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-2(75)-88-97).

11. LECO DH603. Manual, LECO Corporation, 2019.
12. Національний стандарт України. ДСТУ ISO 6892–1:2019 (ISO 6892–1:2016, IDT). Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробувань за кімнатної температури. Київ: ДП „УкрНДНЦ”, 2020, с. 70.
13. Національний стандарт України. ДСТУ EN 10002–5:2006 (EN 10002–5:1991, IDT). Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 5. Метод випробувань за підвищених температур. Київ: Держспоживстандарт України, 2008, с. 24.
14. Національний стандарт України. ДСТУ ISO 148–1:2022 (ISO 148–1:2016, IDT). Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Частина 1. Метод випробування. Київ: ДП „УкрНДНЦ”, 2022, с. 26.
15. Jack T., Webb M.A., Rahman K.M.M., Fazeli F., Szpunar J. Hydrogen uptake and embrittlement behavior in pipeline steels: Insights from slow strain rate testing and synchrotron micro CT imaging. Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 172. Art. no. 109419.
16. Paterlini L. et al. Mechanical testing methods for assessing hydrogen embrittlement of pipeline steels in high pressure hydrogen environments. Metals. 2025. Vol. 15, Is. 10. Art. no. 1123.
17. Rahimi S., Verbeken K., Depover T., Proverbio E. Hydrogen embrittlement of pipeline steels under gaseous and electrochemical charging: A comparative review on tensile properties. Engineering Failure Analysis. 2025. Vol. 167. Art. no. 108956.
18. Dadfarnia M., Nagao A., Sofronis P. Hydrogen interaction with defects. Acta Materialia. 2015. Vol. 98. P. 1-13.
19. Zvirko O., Tsyrunyk O., Lipiec S., Dzioba I. Evaluation of corrosion, mechanical properties and hydrogen embrittlement of casing pipe steels with different microstructure. Materials. 2021. Vol. 14, Is. 24. Art. no. 7860.
20. Wahab Chowdhury M., et al. Hydrogen effects on fracture toughness and tensile properties of pipeline steels: A review. Materials Science and Engineering: A. 2025. Vol. 825. Art. no. 142746.

Стаття надійшла до редакційної колегії 02.04.2026 р.

Прийнято до друку 25.04.2026 р.

**INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON CHANGES
IN MECHANICAL PROPERTIES OF DRILL STRING STEEL
ELEMENTS****V. I. Artym**¹ *, **B. A. Novoselskyi**¹ , **I. O. Lastivka**² ¹*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine**e-mail: volodymyr.artym@nung.edu.ua*²*State university «Kyiv aviation institute»;**1 Lubomyr Huzar Avenue, Kyiv, 03058, Ukraine**e-mail: ivan.lastivka@npp.kai.edu.ua*

The article presents the results of a study on the effect of complex operating conditions on changes in the mechanical properties of steels used in drill string components. The aim of the work is the experimental determination of the actual properties of materials of drill string elements and their analysis after long-term operation under the influence of working environments and other operational factors.

It has been established that the operation of drill string elements under the combined action of mechanical loads, elevated temperatures, and hydrogen-containing environments leads to intensive hydrogen saturation of steels (an increase in C_H by 4–7 times), while elevated temperature further intensifies the diffusion and accumulation of hydrogen in steel.

It is shown that with minor changes in strength characteristics (up to 3–5%) under the influence of temperature and hydrogenation, a decrease in impact toughness (by 5–15%) occurs, indicating an increased sensitivity of fracture resistance characteristics to the combined action of these factors.

A correlation between hydrogen concentration and the reduction of KCV has been established, with elevated temperature enhancing the manifestations of hydrogen embrittlement, especially in high-strength steels with a quenched and tempered structure (in particular, 30KhGSA). The obtained results can be used to assess the residual life of drill string components.

Keywords: *drill string, drill pipe, tool joint, tool joint threaded connection, mechanical properties, temperature, property degradation, residual life.*