

УДК 539.4

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ 17Г1С ВІД ТЕМПЕРАТУРИ ВИПРОБУВАНЬ

Д.Ю.Петрина

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42342;

e-mail: public@nung.edu.ua

Ударная вязкость – одна из основных механических характеристик сталей, которая определяет также пригодность материала для изготовления нефтегазопроводов. Оценка склонности стали к хладноломкости по результатам испытания на ударную вязкость имеет свои недостатки, в первую очередь – субъективность построения кривых температурной зависимости ударной вязкости по данным эксперимента. В работе на основе анализа многочисленных экспериментальных данных предложена статистическая модель, описывающая температурную зависимость ударной вязкости в области перехода в хрупкое состояние.

Impact toughness is one of the basic mechanical descriptions of steel, which determines also the fitness of materials for making oil and gas pipelines. Estimation of steel inclination to the cold brittleness on results the test on impact toughness has failings, first of all - subjectivity of curves construction of temperature dependence of impact toughness from data of experiment. In work on the basis of numerous experimental data analysis a statistical model describing temperature dependence of impact toughness in area of transition in the fragile being is offered.

Згідно з нормативним документом [1, с. 3-6] оцінка міцності та поточного технічного стану трубопроводу включає такі питання:

- вивчення технічної та експлуатаційної документації;
- визначення механічних характеристик металу;
- розрахунки на міцність з врахуванням експлуатаційних та пошкоджувальних факторів.

При визначенні механічних характеристик металу використовують значення межі міцності матеріалу (σ_B), межі текучості (σ_T), ударної в'язкості (KCV) і критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{IC}). Поточні значення характеристик матеріалу визначаються через експериментальні випробування матеріалу конкретного трубопроводу під час комплексного діагностичного обстеження. Об'єм випробувань визначається обсягом необхідної вхідної інформації і обов'язково включає визначення ударної в'язкості за ГОСТ 9454-78.

Крім того, метод серіальних випробувань на ударну в'язкість при різних температурах є основним найбільш поширеним якісним методом порівняльної оцінки схильності матеріалів до крихкого руйнування. Він має накопичений величезний експериментальний матеріал, що дозволяє порівнювати різні сталі. Цей метод найбільш простий і поки що єдиний, який здійснюється в умовах заводського контролю масової продукції. Тому можна вважати, що найближчим часом метод ударної в'язкості збережеться як основний метод контролю холодостійкості сталей на металургійних підприємствах.

Поряд з відзначеними перевагами оцінка схильності сталей до холодноломкості за результатами випробувань на ударну в'язкість при одній заданій низькій температурі або при ряді температур в інтервалі падіння ударної

в'язкості має суттєві неодноразово описані та проаналізовані недоліки [3].

Це, по-перше, суб'єктивність побудови кривих температурної залежності ударної в'язкості за даними експерименту і як наслідок – відповідне свавілля при визначенні критичних температур холодноломкості та, по-друге, відсутність фізичної інтерпретації цієї залежності.

З метою подолання першого з недоліків були проведені дослідження, направлені на пошуки методів об'єктивного математичного описання температурної залежності ударної в'язкості сталей в інтервалі переходу від в'язкого до крихкого руйнування [4]. Запропоновані рівняння з досить доброю точністю описували температурні залежності ударної в'язкості. Одне з цих рівнянь представлено таким чином:

$$KCV = KCV_0 \cdot \exp[-n \cdot \exp(-mT)] \quad (1)$$

де: KCV – величина ударної в'язкості при температурі T ;

KCV_0 – значення ударної в'язкості в температурній області повністю в'язких зломів;

n і m – коефіцієнти, постійні для даного матеріалу.

Інше запропоноване для опису температурної залежності ударної в'язкості рівняння має вигляд

$$KCV^{-1} = KCV_0^{-1} + KCV_{кр}^{-1} [-q(T - T_{кр})] \quad (2)$$

де: KCV^{-1} – величина ударної в'язкості, прийнята в якості критерія для визначення умовної критичної температури $T_{кр}$;

q – коефіцієнт з розмірністю, оберненою температурі.

Це рівняння має переваги перед рівнянням (1), оскільки дає можливість вести обробку експериментальних даних за методом найменших квадратів і зручне для визначення умовних критичних температур крихкості.

За допомогою рівняння (2) описані температурні залежності ударної в'язкості, отримані в результаті дослідження впливу деяких факторів на холодостійкість сталі, та показана можливість опису впливу різних факторів на схильність до холодноламкості через зміну коефіцієнтів цього рівняння.

Рівняння (1) і (2) були виведені чисто емпіричним шляхом, і їх коефіцієнти не мали фізичного змісту. Отже, другий з названих вище недоліків визначення схильності сталей до холодноламкості за температурними залежностями ударної в'язкості з застосуванням рівнянь (1) і (2) не усувався. Цей недолік певною мірою удається подолати, якщо йти шляхом, запропонованим А.Стро [5, с. 29]. Він вважає, що пластичне деформування або крихке руйнування навантаженого металу залежить від того, чи відбудеться за час навантаження звільнення дислокацій від утримуючих їх скупчень домішкових атомів. Підраховавши енергію пружного поля напружень, створюваних дислокаціями, Стро показав можливість виникнення тріщини в сусідньому зерні під значним кутом (70°) до ліній ковзання. Деблокування дислокацій – процес термічно активований. Якщо для активації процесу необхідна енергія U , то ймовірність того, що за одиницю часу відбудеться деблокування дислокацій і почнеться пластична деформація виразиться рівнянням

$$P_o = v \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (3)$$

де: T – температура; k – постійна Больцмана; v – коефіцієнт з розмірністю частоти.

Середній час τ , необхідний для того, щоб почалася пластична деформація, визначиться за рівнянням

$$\tau = \frac{1}{P_o} = \frac{1}{v} \exp\left(\frac{U}{kT}\right). \quad (4)$$

Тоді ймовірність того, що за час t не почнеться пластична деформація, а замість неї наступить крихке руйнування буде

$$P = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \text{ або } P = \exp\left[-tv \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)\right]. \quad (5)$$

Припущення Стро про те, що перехід в крихкий стан визначається трудностю деблокування дислокацій, загальмованих атмосферами сторонніх атомів, не є єдиним припущенням про фізичну природу цього переходу. Так, наприклад, Г.Конрад [6] вважає, що основний вклад в підвищення опору пластичному деформуванню при зниженні температури вноситься утрудненням термічно активованого процесу подолання напружень Пайєрлса–Набарро.

За Конрадом [6] швидкість зсувової деформації визначається рівнянням

$$\dot{\gamma} = \rho b s v \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (6)$$

де: ρ – щільність дислокацій; b – вектор Бюргерса; s – добуток числа позицій на одиничній довжині дислокації, на якій може виникнути

термічна активація, на площу, яка захоплюється в акті термічної флуктуації; U – енергія активації.

Якщо тепер на базі рівняння (6) вивести залежність ймовірності крихкого руйнування від температури тим же шляхом, який використаний при виведенні рівняння (5), то отримаємо

$$P = \exp\left[-t \rho b s v \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)\right]. \quad (7)$$

Як видно, рівняння (5) і (6) відрізняються тільки структурою передекспоненціального члена. Вигляд рівняння не залежить від того, який термічно активований процес розглядається в якості процесу, що визначає результат навантаження зовнішніми силами.

Не віддаючи переваги будь-якому із запропонованих дислокаційних механізмів утруднення пластичного деформування при пониженні температури і припускаючи, що в будь-якому випадку пластичне деформування є процесом термічно активованим, ми прийняли для опису температурної залежності ймовірності крихкого руйнування рівняння вигляду

$$P = \exp\left[-b \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)\right], \quad (8)$$

де b – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від складу та структури випробуваного металу і, ймовірно, від умов випробування.

Стро уже робив спробу визначити енергію активації процесу пластичної деформації за результатами випробувань на ударну в'язкість. Ймовірність крихкого руйнування визначалася як відношення числа зразків, які зруйнувалися при даній температурі крихко, до загального числа випробуваних зразків. При випробуванні реальних металів при даній температурі, що відноситься до перехідного інтервалу, спостерігаються повністю крихкі руйнування, повністю в'язкі та такі, при яких ударна в'язкість має різні проміжні значення. Останніх в ряді випадків буває більшість.

Якщо за крихке руйнування вважати таке, при якому ударна в'язкість прямує до нуля, то схильність до крихкості при даній температурі природно оцінювати зміною ударної в'язкості по відношенню до рівня значення цієї характеристики при повністю в'язких руйнуваннях,

$$\text{тобто величиною } 1 - \frac{KCV}{KCV_g}.$$

Можна вважати, що в кожному зразку, що зруйнувався в зоні перехідних температур за умови $0 < KCV < KCV_g$, є численні об'єми, які руйнувалися в'язко при максимальній питомій роботі руйнування, і об'єми повністю крихкі, на руйнування яких робота майже не затрачується.

В цьому випадку вираз $1 - \frac{KCV}{KCV_g}$ являє собою ймовірність крихкого руйнування при даній температурі

$$P = 1 - \frac{KCV}{KCV_g}. \quad (9)$$

Енергія активації пластичного течіння є складною функцією діючого напруження та температури, загальний вигляд якої достеменно невідомий. Огляд різних даних про вплив цих факторів на енергію активації засвідчує [6], що енергія активації повинна зменшуватися з пониженням температури та підвищенням напружень. При великих напруженнях, діючих в сталі при випробуванні на ударну в'язкість, залежністю енергії активації від рівня напружень можна знехтувати, базуючись на наведених в [6] даних, які свідчать, що при таких напруженнях ця залежність невелика. Є також дані, що при температурах нижче 200К, коли переважно спостерігається перехід сталі в крихкий стан, енергія активації пластичного течіння мало залежить від температури [6]. Опираючись на ці дані при обробці експериментальних результатів, було прийнято, що енергія активації пластичного течіння в умовах випробувань на ударну в'язкість в температурному інтервалі переходу від в'язкого руйнування до крихкого є в першому наближенні величиною постійною.

Враховуючи дослідження А.Стро і Г.Конрада [5, 6], можна вважати, що величина передекспоненціального члена b прямо пропорційна часу дії напружень і активаційному об'єму. При випробуваннях на ударну в'язкість час дії напружень становить мілісекунди і змінюється порівняно мало. Враховуючи, що температура переходу в крихкий стан порівняно слабо залежить від величини b , що впливає з наведеного нижче рівня (11), можна вважати, що в температурному інтервалі переходу від в'язкого руйнування до крихкого зміна величини передекспоненціального члена, зумовлена зміною часу деформування, досить мала для того, щоб нею в першому наближенні можна було знехтувати. Тим більше, можна знехтувати зміною активаційного об'єму при зміні температури випробувань однієї й тієї ж сталі [6]. При таких припущеннях величина енергії активації пластичного течіння при випробуванні на ударну в'язкість і величина передекспоненціального члена b можуть розглядатися як функції складу та структури сталі, а також гостроти надрізу зразка, призначеного для випробувань на ударну в'язкість.

Двічі прологарифмоване рівняння (8) наведе вигляду

$$\ln(-\ln P) = \ln b - \frac{U}{kT} \quad (10)$$

Таким воно використане в роботі для визначення значень U і b за експериментальними даними серійних випробувань на ударну в'язкість.

Для визначення за експериментальними даними параметрів рівняння (8) необхідне достатньо точне значення KCV_6 . При експериментальних дослідженнях холодостійкості сталей на визначення цієї характеристики зазвичай не приділяють достатньо уваги. Верхня частина кривої холодноламкості, особливо якщо вона лежить при температурі вище кімнатної, часто не визначається зовсім.

В ряді джерел, матеріали яких були опрацьовані за рівнянням (8), не було достатньо повних даних щодо цієї частини кривих. Тоді значення KCV_6 визначались розрахунком. Для цього вибирались для проби п'ять допустимих рівней KCV_6 , які, судячи за розміщенням експериментальних точок, могли б розглядатися в якості ймовірних. Розрахунок для визначення коефіцієнтів рівняння (8) проводився для кожного з вибраних пробних рівней KCV_6 . Найбільш правильним рахувався той рівень KCV_6 , розрахунок за яким давав криву температурної залежності ударної в'язкості, найбільш близьку до експериментальних точок. Ця близькість оцінювалася за величиною залишкової дисперсії.

З 172 кривих температурної залежності ударної в'язкості, для яких визначалися коефіцієнти рівняння (8), для 22 кривих розрахунок проводився за єдиним рівнем KCV_6 , тому що розгляд відповідних експериментальних даних давав можливість вважати, що величина максимальної ударної в'язкості визначена досить добре. В решті 150 випадках для кожної серії експериментальних точок проводився розрахунок за п'ятьма варіантами KCV_6 . Для 71 випадку краще наближення до експерименту дало крайнє нижнє значення KCV_6 в пробному ряді, для 44 випадків – значення в середині цього ряду, а для 35 випадків – найбільше з взятих для проби значень KCV_6 .

Величина індексу кореляції (таблиця 1), що характеризує щільність зв'язку між змінними, залежала від того, наскільки надійно визначалося значення KCV_6 .

Як видно з таблиці, найчастіше поява найвищих індексів кореляції спостерігалася тоді, коли оптимальні з точки зору мінімуму залишкової дисперсії значення KCV_6 проявлялися на початку або в середині ряду, тобто тоді, коли вони визначалися найточніше.

Наведені в таблиці дані свідчать, що визначення максимального значення ударної в'язкості "на око" безпосередньо за експериментальними даними менш надійне, ніж вибір за результатами пробних розрахунків навіть у тому випадку, коли пробний ряд складається всього з п'яти значень.

Рішення рівняння (10) відносно дає можливість визначити температуру, яка відповідає заданій ймовірності крихкого руйнування, тобто умовну критичну температуру

$$T = \frac{U}{k[\ln b - \ln(-\ln P)]} \quad (11)$$

Величина $\ln b$ зазвичай має порядок одиниць. Член $\ln(-\ln P)$ стає співставним з $\ln b$ при великих значеннях ймовірності, що відповідають нижній частині кривої температурної залежності ударної в'язкості. Так, при ймовірності крихкого руйнування 0,9 $\ln(-\ln P)$ дорівнює $-2,25$, а при ймовірності 0,99 абсолютна величина подвійного логарифму ймовірності зростає до 4,59. З підвищенням ймовірності крихкого руйнування, що приймається як критерій для визначення умовної критичної темпе-

ратури крихкості, роль знаменника в рівнянні (11) зменшується, і залежність цієї температури від енергії активації стає більш чіткою.

критичних температурах крихкості матеріалів є наслідком відхилення конкретних експериментальних даних від цього зв'язку, який формально

Таблиця 1 – Розподіл значень індексу кореляції для різних випадків розміщення оптимальних значень KCV_e в пробному ряді

Розміщення оптимального значення в пробному ряді	Загальне число випадків	Частота (%) появи індексів кореляції величиною				
		нижче 0,961	від 0,961 до 0,970	від 0,971 до 0,980	від 0,981 до 0,990	від 0,991 і вище
Розрахунок за одним значенням	22	9	10	18	34	29
Внизу	71	4	13	8	22	53
В середині	44	17	7	8	9	59
Вгорі	35	18	20	11	24	27
Всього	172	11	12	10	20	47

На рис. 1 зображена залежність нижньої критичної температури крихкості, вирахованої для ймовірності крихкого руйнування 0,9, від енергії активації пластичного течіння. Поле розкиду експериментальних точок досить широке, тому що окрім величини енергії активації на критичну температуру, впливає також величина передекспоненційного члена.

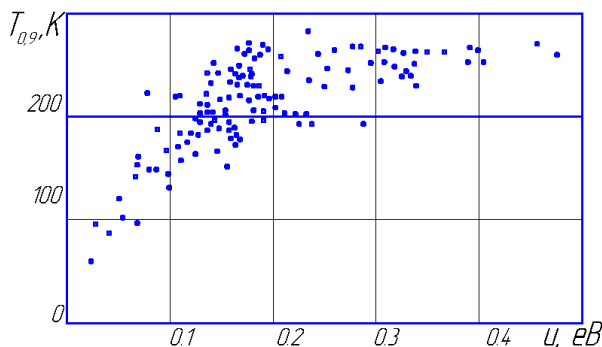


Рисунок 1 — Зв'язок між енергією активації пластичного течіння та нижньою критичною температурою

Недивлячись на це, з рисунка видно, що критична температура швидко зростає з підвищенням енергії активації тільки до величини 0,2 eV. З подальшим підвищенням енергії активації ріст критичної температури практично припиняється. Очевидно, починаючи з 0,2 eV, підвищення енергії активації компенсується відповідним ростом передекспоненційного члена. Зв'язок між величинами енергії активації та передекспоненційного члена існує у всій досліджуваній області. Графічно він представлений на рис. 2 сильно витягнутою зоною розкиду експериментальних точок. З цього рисунка видно, що в області значень енергії активації більше 0,2eV зона розкиду не розширюється з підвищенням енергії активації. Це свідчить про підвищення в даній області щільності зв'язку між параметрами крихкого руйнування, які розглядаються.

Розглядаючи представлений на рис. 2 зв'язок, необхідно мати на увазі, що він, в принципі, не функціональний. Відмінність в

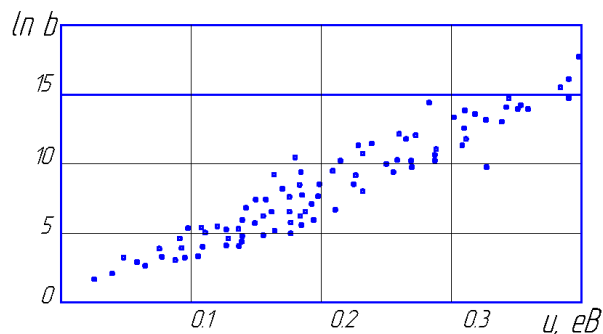


Рисунок 2 — Зв'язок між коефіцієнтами рівняння, що описує перехід сталі в крихкий стан при випробуванні на ударну в'язкість

можна описати відповідним лінійним рівнянням.

На рис. 2 нанесені всі отримані при обробці експериментальних даних точки, незалежно від складу сталей, термічної обробки, виду надрізу. Загальною ознакою є тільки вид випробувань – ударний згин надрізаних зразків. Перехід до ударного розтягу супроводжується не тільки зниженням енергії активації, але й суттєвим підвищенням величини $\ln b$; змінюється й зона розкиду точок.

Більша частина вирахованих нами значень енергії активації має порядок 10^{-1} eV, що добре узгоджується з літературними даними [6]. Це підтверджує правомірність оцінки переходу сталей в крихкий стан з допомогою запропонованого рівняння. Використання цього рівняння для опису результатів випробувань сталей на холодноламкість методом ударної в'язкості дасть змогу накопичити необхідні дані для більш глибокого статистичного вивчення впливу різних факторів на холодноламкість сталей. В основі такого вивчення повинен лежати кореляційний і регресивний аналіз зв'язку між параметрами рівняння холодноламкості та величинами цих факторів. Добру основу для розвитку знань у цьому напрямку має труба сталь 17Г1С, оскільки в роботі [2] показана можливість точного визначення її значення KCV_e методом електроннофрактографічного аналізу. Останнє в свою чергу забезпечує точність ви-

значення значень критичних температур холодноламкості.

Література

1. ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с.
2. Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень / Є.І.Крижанівський, В.П.Рудко, О.О.Онищук, Д.Ю.Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 1(6). – С. 6-11.
3. Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности. – М.: Машиностроение, 1987. – 212 с.
4. Бухвостова Н.Г., Попов К.В. Опыт математического выражения зависимости ударной вязкости малоуглеродистой стали от температуры испытаний и содержания углерода // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1966. – № 12. – С. 111-115.
5. Механика разрушения и прочность материалов.: Справочное пособие: В 4-х т. / Под общей ред. Панасюка В.В. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 1: Основы механики разрушения материалов / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. – 487 с.
6. Конрад Г. Текучесть и пластическое течение о.ц.к. металлов при низких температурах // В кн.: Структура и механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1967. – С. 225-254.

УДК 539.4

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ НАСОСНИХ ШТАНГ

¹В.М.Івасів, ¹В.І.Артим, ¹В.Р.Харун, ²П.В.Пушкар

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42002;
e-mail: public@nuing.edu.ua

²НГВУ “Надвірнанафтогаз”, 78400, м. Надвірна, вул. Грушевського, 13

Работа посвящена оценке эксплуатационной нагрузки насосных штанг и её влияния на их долговечность. Проанализированы результаты эксплуатационной нагрузки насосных штанг на работающей скважине, полученные с помощью разработанной конструкции динамографа с датчиком малых перемещений. Для анализа используются ранее проведенные экспериментальные исследования насосных штанг на коррозионную усталость. Расчеты производятся по разработанной методике с учетом закономерностей накопления коррозионно-усталостного повреждения.

The paper is dedicated to an estimation of operation load on pump rods and its influencing on their durability. The results of pump rods operation load on an operating oil well obtained with the help of a designed construction of a dynamograph with the sensor of small movements are parsed. For analysis the earlier held experimental researches of pump rods on a corrosion fatigue will be used. The analysis of results is made under the designed method of application with allowance for of regularities of upbuilding of corrosion-fatigue damage.

Як відомо, понад 70% діючих свердловин України оснащені свердловинними штанговими насосними установками (СШНУ). Дане співвідношення зберігається і при введенні в експлуатацію нових свердловин.

Найбільша кількість аварій пов'язана з глибинним обладнанням, а саме: насосом та колоною штанг. Глибинний насос – це деталь установки, довговічність якої є найменшою. Відмови насоса через зношування є передбачуваними, оскільки не мають раптового характеру, і при своєчасній заміні зношених деталей не призводять до аварійних ситуацій.

Найбільш небезпечними є аварії, пов'язані з поломкою насосних штанг (НШ), оскільки вони приводять до значних простоїв всієї СШНУ, викликаних ловильними та відновлювальними роботами. Змінні навантаження розтягу, а в нижній частині і стиску, вплив корозійно-активного середовища та інших експлуатаційних факторів призводять до появи та інтенсивного

розвитку корозійно-втомних тріщин і, як наслідок, до руйнування та обриву колони штанг. Кількість підземних поточних ремонтів, пов'язаних з аварійністю колони штанг, тільки по НГВУ “Надвірнанафтогаз” за три останні роки склала 97, з яких 68 аварій колони штанг та 29 заміни полірованого штоку. У зв'язку з цим проблема забезпечення надійності колони насосних штанг є надзвичайно актуальною.

Важливе теоретичне та практичне значення для вирішення цієї проблеми має розробка методики оцінки довговічності колони насосних штанг (КНШ) з урахуванням впливу експлуатаційних факторів.

Оцінці довговічності КНШ присвячена велика кількість теоретичних та експериментальних досліджень [1-4]. Так, в роботі [3] приведені криві втоми як нових, так експлуатованих насосних штанг після їх відновлення технологічними методами. Але існує обмежена кількість робіт, які б були присвячені питанню оці-