



Нахайчук О. В.

Музичук В. І.

*Вінницький
національний аграрний
університет*

Nahaichuk O. V.

Myzithyk V. I.

*Vinnitsia National
Agrarian University*

УДК 621.771

СТАТИСТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ

Анотація. В статті наведена методика визначення залишкової пластичності матеріалів труб на різних стадіях експлуатації. При виконанні роботи вимірювався розподіл твердості на дослідних зразках, вирізаних із труб.

Інша серія експериментальних досліджень була присвячена дослідженню втомлюваності матеріалів труб при їх довгостроковій експлуатації, а також матеріалів, не задіяних в роботі. За результатами виконаних досліджень будувались криві Веллера.

При виконанні досліджень була прийнята гіпотеза про випадковий розподіл значень твердості по довжині зразка. Застосований метод оцінки емпіричних даних за автокореляційними функціями.

Наведені емпіричні автокореляційні функції для другої та четвертої дискретних різничних величин твердості.

Застосована методика кількісної оцінки пластичності матеріалів в процесі їх експлуатації.

Ключові слова: Статистичні підходи, пластичність, труби, твердість, втомлюваність металів, розрахунок, експеримент.

Вступ. Забезпечення безпеки експлуатації труб великого діаметру, які застосовуються в нафто- та газопроводах, має велике значення для народного господарства. При цьому, актуальним є питання розробки методики оперативного контролю стану їх матеріалу в меридіональному та окружному напрямках. Відомо [1], що на стан пластичності комплексний вплив чинять: температурний режим, циклічний характер силової дії, високі тиски та ін. Крім цього, при довготривалій експлуатації є можливим утворення макро та мікротріщин, що в подальшому може привести до локальної втрати міцності і неможливості подальшої експлуатації.

В даній роботі пропонується спосіб непрямої оцінки залишкової пластичності стосовно труб великого діаметру, виготовлених із сталі 17ГС після 20-річної експлуатації.

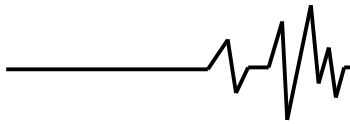
Проблема в загальному вигляді полягає у визначенні залишкової пластичності матеріалів труб при їх довгостроковій експлуатації.

Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями розвитку нафтової та газової промисловості

України, зокрема, діагностування та вибір матеріалів труб великого діаметру.

Задачами досліджень є розрахунок залишкової пластичності матеріалів труб великого діаметру з використанням статистичних підходів та результатів досліджень матеріалів на втомлюваність.

Виклад основних результатів досліджень. Для експериментальних досліджень з матеріалів трубопроводів виготовлялись лабораторні зразки діаметром 7...8 мм. Був використаний метод твердості HV [2] на приладі ПМТ-3 при робочому навантаженні на індентор 0,9807 Н (100 гс). Відбитки наносили на попередньо поліровану поверхню вздовж вісі x зразка з кроком $\Delta x = 100$ мкм. Об'єм вибирання (число відбитків становив величину $m = 192$). Для отримання достовірних даних виконувались чотирикратні виміри кожної діагоналі з подальшим розрахунком стандартної похибки індивідуального результату. У випадку перевищення стандартної похибки величини 5% отримані результати виключали із розгляду. За результатами виміру діагоналей визначали величини твердості, яку в літературі прийнято



називати мікротвердістю в локальних об'ємах матеріалів. Характерний лінійний розмір – в подальшому розуміється як мезомасштабний рівень локального об'єму (довжина діагоналі відбитку) при цьому складає величину $D \approx 25...35$ мкм. Статичний аналіз помилок показав, що середня стандартна помилка виміру твердості для всієї виборки не виходить із інтервалу $\pm 0,5$ %. Також було прийняте положення, що значення твердості в локальних мезооб'ємах інтегрально відображають пошкодження металу в цих об'ємах. Таке припущення не суперечить фізичному змісту: локальні тріщини, що утворюються при експлуатації (на масштабному рівні $\sim D$ та менші) в статистичних показниках мають впливати на довжини діагоналей відбитків, а отже і на величину твердості.

Інша серія експериментальних досліджень була присвячена дослідом на втомлюваність вказаних зразків, а також, для порівняльного аналізу аналогічних зразків зі сталі 20 при аналогічних умовах експерименту, але без виробничого використання цієї сталі. Досліди проводились при нормальних умовах на гідро-імпульсаторі МУП-20 до руйнування при числі циклів N . Коефіцієнт асиметрії складає величину $r = 0$. За результатами досліджень будувались криві Веллера в координатах: максимальне напруження циклу – логарифм довговічності ($\sigma_{max} - \lg N$), а також графіки накопичених при цьому деформацій ($\psi_N - \lg N$).

На першому етапі дослідження була прийнята гіпотеза про випадковий розподіл значень твердості по довжині зразка. Побудова емпіричної гістограми значень твердості (рис. 1) для всієї виборки та статистичний аналіз [3] результатів з великим рівнем достовірності показали, що їх розподіл добре узгоджується із законом нормального розподілу (законом Гауса). В подальшому це надало можливість застосовувати метод оцінки емпіричних даних по автокореляційним функціям [4], який добре апробований для розподілу випадкових величин за законом Гауса. Дисперсія значень твердості більш ніж на два порядки перевершувала дисперсію помилок її виміру, що дозволило в першому наближенні нехтувати впливом помилок на розходження величин, що вивчалися. Оцінка статистичної значущості [3] результатів обробки експериментальних даних, проведена за t -критерієм Стюдента, підтвердила їх достовірність з вірогідністю не менше 95 %. Окрім закону розподілу, на цьому ж етапі досліджувались закономірності зміни величин твердості по довжині зразка. Дані

закономірності виявили з використанням методики, аналогічної запропонованій раніше при вимірюванні локальних деформацій [5] і заснованої на аналізі кінцевих різниць дослідних величин, що визначають зміни цих величин по довжині зразка.

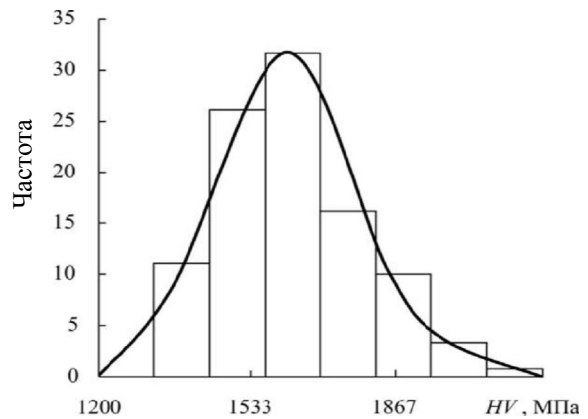


Рис. 1. Гістограма розподілу мікротвердості для сталі 17ГС

На рис. 2 приведені емпіричні автокореляційні функції для другої та четвертої дискретних різниць величин твердості. Різниці підраховувались для двох отриманих вздовж вісі x зразка результатів вимірів. При цьому аналізувались сусідні локальні ділянки в інтервалі 100...400 мкм. Як відомо, для функціональних залежностей різниці являються кінчними аналогами диференціалів, отже, і відповідних їм похідних, характеризуючих характер зміни дослідної функції.

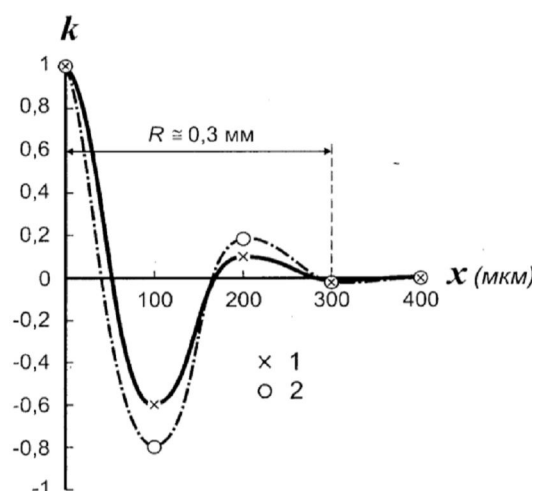
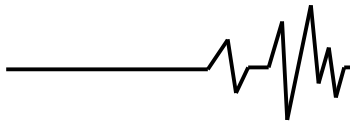
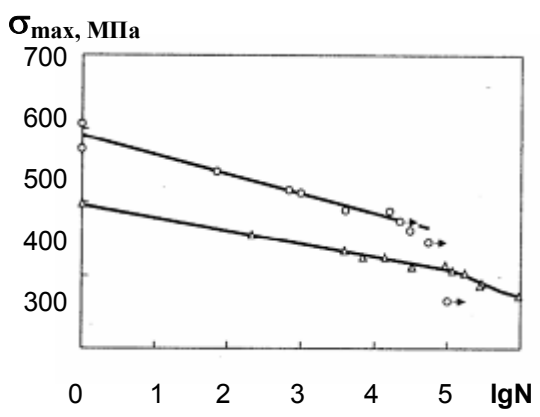


Рис. 2. Автокореляційні функції для другої (1) і четвертої (2) різниць величин локальної твердості сталі 17ГС

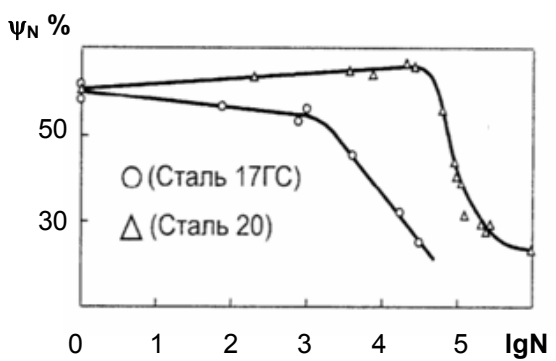


Автокореляційні функції мають радіус затухання $R \approx 0,3$ мм, що перевищує на порядок мезарівень (D). Даний факт (тобто факт кореляції в сусідніх найближчих мікрооб'ємах ступеня зміни пошкоджень мезомасштабного рівня) дозволяє припустити, що пошкоджуваність матеріалу після його багаторічної експлуатації не вичерпується тільки схоластичним характером, але й ще має детерміновану складову. Враховуючи нашу гіпотезу про фізичний зміст пошкоджень на рівні $\sim D$, будемо вважати, що виявлена кореляція відображує взаємодію (на радіусі R) між собою полів мікронапружень від локальних тріщин, які розсіяні випадково по структурі сталі після її експлуатації. Виникнення в пошкодженому матеріалі таких взаємодіючих внутрішніх макрополів та додавання їх з полем напружень від зовнішніх силових факторів повинно суттєво відобразитися на його механічній поведінці (особливо при циклічних навантаженнях).

На рис. 3 для двох матеріалів наведені експериментально визначені криві втомлюваності та накопичених деформацій.



а)



б)

Рис. 3. Криві Веллера (а) і накопичених деформацій (б) для двох дослідних сталей

Границя квазистатичної області руйнувань, прийнята за умовою $\psi_N/\psi = 1/2$, для сталі 17ГС складає $\approx 10^3 \dots 10^{4.5}$ циклів. В даному діапазоні для неї спостерігається різке падіння пластичності (рис. 3, б). Таке достатньо раннє падіння пластичності при циклічних руйнуваннях в малоцикловій області втомлюваності не характерне для маловуглецевих сталей феритно-перлитного класу, до яких відноситься ця сталь, і спостерігається при меншому N , чим, наприклад, у сталі 20 (близької по структурі і фазовому складу до 17ГС), але випробуваної без попередньої експлуатації.

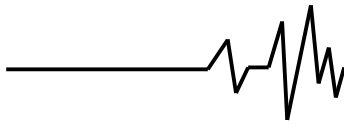
Експериментально виявлений факт більш раннього вичерпання сталі 17ГС пластичності пояснюється наявністю в структурі цієї сталі пошкоджень, отриманих в процесі її експлуатації в складі трубопроводу. Ці пошкодження прискорюють при циклічних навантаженнях крихкість матеріалу, яка не може не відобразитись на його пластичності. Крихкість супроводжується також і великим зниженням циклічної міцності. Порівняння зі сталлю 20 (рис. 3, а) показало, що якщо на базі руйнуючого числа циклів $N = 10^4$ зменшення міцності по відношенню до статичної для сталі 20 складає біля 15 %, то сталь 17ГС (після експлуатаційного пошкодження в складі трубопроводу) має падіння при тих же значеннях N вже близько 20%.

Оскільки безпосередні статичні дослідження зразків, виготовлених із пошкодженої сталі 17ГС, не показали значного падіння пластичності, в даному дослідженні розроблений непрямий метод оцінки такого падіння, на основі приведеного вище аналізу. Використовуючи отримані результати, можна запропонувати наступну методику кількісної оцінки пластичності матеріалу в процесі експлуатації. Для цього використаємо рівняння емпіричної лінії регресії, що пов'язує пластичність ψ матеріалу і границю довговічності $N_{0,5}$ квазистатичних руйнувань.

За нашими даними, $\lg N_{0,5} = 4,2$ (рис.3, б) і тоді з формули $N_{0,5} = 140 \cdot \exp(10,3 \cdot \psi)$ [6] отримаємо залишкову після експлуатації дійсну пластичність:

$$\psi = (\lg N_{0,5} - p \cdot \ln 140) / 10,3 \cdot p = 0,459 \approx 46 \%,$$

де p – відношення десятичного логарифму до натурального) Оскільки пластичність (без попередніх пошкоджень) для цієї марки знаходиться на рівні $\approx 61\%$, залишковий резерв пластичності пошкодженої сталі 17ГС складає $\approx 0,75$ від цього значення. Достовірність такого



прогнозу суттєво залежить як від об'єму вибірки, на якій отримано рівняння лінії регресії $N_{0,5} = f(\psi)$, так і від надійності емпіричного графіку падіння пластичності ($\psi_N - \lg N$) для дослідного матеріалу. Сучасними статистичними методами аналізу експериментальних даних [3] цей рівень достовірності оцінюється кількісно.

Висновки

1. Наявність пошкоджень схоластично-детермінованого характеру, виявлених в сталі 17ГС кореляційним аналізом темпів зміни локальної твердості, обумовлює зниження реальної пластичності матеріалу в процесі експлуатації.

2. Залишковий резерв пластичності може бути розрахований (діагностований) із контрольованим рівнем достовірності по відомим емпіричним залежностям.

3. Подальша експлуатація труб великого діаметру допустима тільки в тому випадку, коли пластичність матеріалу кожної ділянки виявляється не нижчою гранично допустимої (нормативної) величини, визначення якої являє самостійну задачу.

Список використаних джерел

1. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Metallurgiya, 1970. – 229 с.
2. Харитонов Л.Г. Определение микро-твёрдости – М.: Metallurgiya, 1967. – 423 с.
3. Р. Фейнман. Статистическая механика. – М.: Мир, 1975. – 402 с.
4. Богачев И.Н. Введение в статистическое металловедение / И.Н. Богачев, А.А. Вайнштейн, С.Д. Волков. – М.: Metallurgiya, 1972. – 216 с.
5. Чистяков А. В., Бутенко В. И. Обеспечение качественных и эксплуатационных показателей поверхностного слоя деталей при механообработке. – Новочеркасск, 1997. 207 с.
6. Сосновский Л.А., Богданович А.В. Трещиностойкость. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 366 с.

Список джерел в транслітерації

1. Kolmogorov V. L. Napryazheniya deformatsiy, razrusheniye. – М.: Metallurgiya, 1970. – 229 с.

2. Kharitonov L. G. Opredeleniye mikro-tverdsti – М.: Metallurgiya, 1967. – 423 s.

3. R. Feynman. Statisticheskaya mekhanika. – М.: Mir, 1975. – 402 s.

4. Bogachev I. N. Vvedeniye v statisticheskoye Metallovedeniye / I. N. Bogachev, A. A. Vaynshteyn, S. D. Volkov. – М.: Metallurgiya, 1972. – 216 s.

5. Chistyakov A. V., Butenko V. I. Obespecheniye kachestvennykh i ekspluatatsionnykh pokazateley poverkhnostnogo sloya detaley pri mekhanooobrabotke. – Novocherkassk, 1997. 207 s.

6. Sosnovskiy L. A., Bogdanovich A. V. Treshcinostoykost. – Gomel: BelGUT 2011. – 366 s.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Аннотация. В статье приведена методика определения остаточной пластичности материалов труб на различных стадиях эксплуатации. При выполнении работы измерялось распределение твёрдости на различных участках образцов, вырезанных из труб.

Другая серия экспериментальных исследований была посвящена испытаниям на усталостную прочность материалов труб при их длительной эксплуатации, а также материалов без производственной эксплуатации. По результатам исследования строились кривые Вёллера.

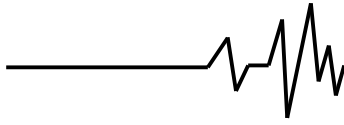
При исследованиях была принята гипотеза о случайном распределении значений твёрдости по длине образца. Применён метод оценки эмпирических данных по автокорреляционным функциям.

Приведены эмпирические автокорреляционные функции для второй и четвёртой дискретных разностей величин твёрдости. Предложена методика количественной оценки пластичности материала в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: статистические подходы, пластичность, трубы, твёрдость, усталость материалов, расчёт, эксперимент.

STATISTICAL APPROACH TO PLASTICITY MATERIALS LARGE DIAMETER PIPES

Annotation. The article describes the method of determining the residual ductility of pipe materials in various stages of operation. When the



work was measured hardness distribution in different parts of the samples cut from the pipes.

Another series of experimental studies was devoted to the study of fatigue test pipe materials for their long service life, as well as the production of materials without exploitation. According to the study fit the curve Weller.

In studies of adopted hypothesis of a random distribution of hardness along the length of the sample. Applied the method of evaluation of empirical data on autocorrelation functions.

Empirical autocorrelation functions for the second and fourth differences of discrete values of hardness. The technique of quantitative evaluation of the plasticity of the material in the process lo operation.

Keywords: *statistical approaches, plasticity, pipes, hardness, fatigue of materials, calculation, experiment.*