

УДК 622.692.4.053:620.179.12

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ТРУБ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
А.Н. ЯНУШОНОК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлен метод неразрушающего контроля магистральных трубопроводов, основанный на возможности косвенного определения основных механических свойств металла неразрушающим способом. Получены корреляционные уравнения взаимосвязей значений твердости по Виккерсу и измеренных размеров пирамидального отпечатка при контроле твердости, с механическими свойствами металла труб магистральных трубопроводов. Приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных исследуемых взаимосвязей для труб магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и стали 09Г2С.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, неразрушающий контроль, механические свойства, твердость.

Введение. Срок эксплуатации большей части магистральных трубопроводов (нефте- и газопроводов), расположенных на территории Республики Беларусь, превышает назначенный срок службы и для отдельных участков приближается к 60 годам. Вследствие воздействия эксплуатационных факторов с течением времени происходит деградация механических свойств металлических конструкций, что снижает их надежность, а зачастую приводит к аварийным ситуациям. Актуальной задачей является комплексная и максимально объективная оценка их фактического технического состояния с целью обеспечения надежности и безопасности функционирования. На текущий момент о состоянии магистральных трубопроводов судят по данным внутритрубных диагностических обследований, которые дают информацию только о состоянии стенки трубы на основании изменения ее геометрических параметров (вмятины, коррозионные повреждения, расслоения и т.д.) и наличия неметаллических включений. В то же время данные о механических свойствах эксплуатируемых труб являются фрагментарными, полученными, как правило, на участках, подлежащих ремонту методом «замены катушки», стандартными методами испытаний макропроб. Поэтому так важно совершенствование методов определения механических характеристик и, в первую очередь, ударной вязкости, магистральных трубопроводов неразрушающими методами, что позволит проводить контроль без остановки перекачки и вырезки «катушки». На наш взгляд, наиболее перспективными являются методы контроля механических свойств косвенным методом с использованием переносных приборов измерения твердости.

Основная часть. В работе¹ приведен экспресс-метод определения механических свойств, основанный на их расчете по измеренным параметрам отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу. Для изготовления конструкций нефтехимического комплекса обычно используются легированные теплоустойчивые и нержавеющие стали (например, 15X5M, 12X18H10T, 10X17H13M2T и др.), которые обеспечивают работу оборудования при высоких давлениях и температурах в условиях коррозионно-активной среды. Условия эксплуатации магистральных трубопроводов значительно отличаются от условий работы оборудования нефтехимического комплекса, также значительно отличается и материальное исполнение. В связи с этим необходима адаптация существующего метода к новому объекту, что позволит развить представления о взаимосвязях между геометрическими параметрами пирамидального отпечатка с механическими свойствами материала конструкций объектов трубопроводного транспорта и создаст условия, в случае подтверждения наличия устойчивой корреляции между твердостью, параметрами отпечатка пирамидального индентера и фактическими механическими свойствами с целью использования данного метода для повышения надежности длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов.

Для адаптации метода к новому объекту исследований из длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов вырезались «катушки», из металла которых изготавливались образцы для проведения испытаний механических свойств металла труб (предела прочности σ_6 , твердости по Виккерсу HV , относительного удлинения δ_5 и относительного сужения ψ , ударной вязкости KCU), а также размеров полученных отпечатков (диагонали D и ширины S) при измерении твердости по Виккерсу.

¹ Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 237 л.

Взаимосвязи между параметрами пирамидального отпечатка и механическими свойствами металла труб уточнялись методами статистической обработки экспериментальных данных с использованием программного комплекса Mathcad 15.0. Выборку экспериментальных данных аппроксимировали непрерывными функциями, которые представляли собой поверхности, заданные многомерными полиномами второй степени. С помощью многомерного регрессионного анализа устанавливались зависимости $\sigma_b = f(HV, S)$ и $\delta_s = f(D, S)$. Для более простых и надежных уравнений линейной регрессии применялся метод замены переменных как анализ взаимосвязей отношений (σ_b/HV) и (δ_s/D) для функций размера диагонали S . Также с помощью линейных уравнений определялась взаимосвязь между ψ и S .

Решение линейной регрессии проводилось в соответствии со следующим алгоритмом.

Исходные экспериментальные данные задавали векторами X_i и Y_i и определяли их количество n :

$$n := \text{rows}(\text{data}). \quad (1)$$

С помощью вызова встроенных функций Mathcad определяли числовые статистические характеристики векторов выборки²: среднее $\text{mean}(\text{data})$ и медианное $\text{median}(\text{data})$ значения экспериментальных данных, их дисперсию $\text{var}(\text{data})$ и среднее квадратическое отклонение $\text{stdev}(\text{data})$.

С помощью стандартных функций Mathcad определяли параметры линейной регрессии: свободный коэффициент регрессии b_0 и угловой коэффициент регрессии b_1 исходя из условия минимизации суммы квадратов ошибок²:

$$b_0 := \text{intercept}(X, Y), \quad (2)$$

$$b_1 := \text{slope}(X, Y). \quad (3)$$

Рассчитывали коэффициенты корреляции, регрессии и ковариации с помощью следующих стандартных функций Mathcad²:

$$\text{corr}(X, Y), \quad (4)$$

$$R^2 = \text{corr}(X, Y)^2, \quad (5)$$

$$\text{cvar}(X, Y). \quad (6)$$

Определяли среднее квадратическое отклонение, угловой и свободный коэффициенты регрессии с заданным уровнем значимости α , равным 0,05, соответствующее 95% надежности [1]. Для этого в программном комплексе Mathcad² задавались формулы (7) и (8) соответственно:

$$\text{slope_err} = \frac{\text{stderr}(x, y)}{\sqrt{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}, \quad (7)$$

$$\text{int_err} = \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{\text{mean}(x)^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (8)$$

Определяли значения доверительных интервалов экспериментальных данных, используя стандартную функцию Mathcad confm^2 и функцию confy^2 для доверительных интервалов их средних значений:

$$\text{confm}(x_0) := t \cdot \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x_0 - \text{mean}(x))^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}, \quad (9)$$

$$\text{confy}(x_0) := t \cdot \text{stderr}(x, y) \cdot \sqrt{\frac{1}{\text{length}(x)} + \frac{(x_0 - \text{mean}(x))^2}{\sum (x - \text{mean}(x))^2}}. \quad (10)$$

² Потапова Н.Н., Забродина О.М., Богомоллова О.А. Статистическая обработка данных в MathCAD [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе: учеб. электрон. изд. сетевого распространения. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – URL: https://vgasu.ru/attachments/potapova_01.pdf (data dostupa: 08.12.2023).

Решение многомерной полиномиальной регрессии производилось в программном комплексе Mathcad 15.0 с помощью комбинации встроенной функции $regress^3$

$$R := regress(M, V, n) \tag{11}$$

и полиномиальной интерполяции

$$f(x, y) := interp \left[R, M, V, \begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} \right], \tag{12}$$

где M – матрица двух независимых переменных Y_i и Z_i ; V – вектор зависимой переменной X_i ; n – степень полиномиальной регрессионной функции, принятая равной 2.

Строили регрессионную поверхность таким образом, чтобы минимизировать отклонения от нее значений экспериментальных точек³:

$$F := CreateMesh(f, min(Y), max(Y), min(Z), max(Z), 12, 12). \tag{13}$$

Для определения значений коэффициентов мономиальных членов полинома использовали совместно стандартные функции Mathcad $Nterms$ и $COrder(Nvar, deg)$ ³:

$$Nterms(nvar, deg) := (nvar + deg)! / (deg! \cdot nvar!), \tag{14}$$

$$I := COrder(Nvars, deg), \tag{15}$$

$$coeffs := submatrix(R, 3, rows(R)-1, 0, 0), \tag{16}$$

где $Nvars$ – количество переменных полинома; deg – степень полиномиальной функции.

Вид полиномиальной функции определялся с использованием суммы³

$$poly(y, z) := \sum_{i=0}^{last(coeffs)} (coeffs_i \cdot y^{l_{i,0}} \cdot z^{l_{i,1}}), \tag{17}$$

для нахождения коэффициентов полинома использована подпрограмма⁴:

```

Step(v,Nvar,deg):=
  for i ∈ 0..deg if Nvar=1
    vi,0 ← vi,0 + 1
  for i ∈ 0..Nvar-1 if deg=1
    vi,i ← vi,i + 1
  otherwise
    inc ← Nterms(Nvar,deg-1)
    for i ∈ 0..inc-1
      vi,Nvar-1 ← vi,Nvar-1 + 1
      v ← stack(Step(submatrix(v,0,inc-1,0,cols(v)-1),Nvar,deg-1)
        Step(submatrix(v,inc,rows(v)-1,0,cols(v)-1),Nvar-1,deg))
    v
COrder(Nvar,deg):=
  vNterms(Nvar,deg)-1,Nvar-1 ← 0
  Step(v,Nvar,deg)
    
```

Меру прямолинейной связи между переменными x - y , x - z и y - z оценивали коэффициентами парной корреляции Пирсона с использованием следующих формул [1]:

$$r_{xy} = \frac{\mu_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \tag{18}$$

$$r_{xz} = \frac{\mu_{xz}}{\sigma_x \cdot \sigma_z}, \tag{19}$$

$$r_{yz} = \frac{\mu_{yz}}{\sigma_y \cdot \sigma_z}, \tag{20}$$

³ Потапова Н.Н., Забродина О.М., Богомолова О.А. Статистическая обработка данных в MathCAD [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе: учеб. электрон. изд. сетевого распространения. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2014. – URL: https://vgasu.ru/attachments/potapova_01.pdf (data dostupa: 08.12.2023).

⁴ Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополюк: ПГУ, 2008. – 237 л.

где μ_{xy} , μ_{xz} и μ_{yz} – относительное стандартное отклонение (коэффициент ковариации) между величинами x – y , x – z и y – z ; σ_x , σ_y и σ_z – среднее квадратическое отклонение величин x , y и z .

Для расчета частных коэффициентов корреляции, отражающих взаимосвязи между двумя параметрами, когда все остальные исключены из рассматриваемого множества, рассчитывались по формулам [1]

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \cdot r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}}, \quad (21)$$

$$r_{xz,y} = \frac{r_{xz} - r_{xy} \cdot r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xy}^2) \cdot (1 - r_{yz}^2)}}. \quad (22)$$

Значимость частных коэффициентов корреляции оценивалась с помощью t -критерия Стьюдента, значение которого определялось по формуле [1]

$$t_\phi = \frac{r_{xy,z}}{\sqrt{1 - r_{xy,z}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2}, \quad (23)$$

где n – количество экспериментальных данных; l – количество фиксированных переменных.

Расчитанное значение t_ϕ сравнивалось с табличным $t_{кр}$ [1]. При этом, если расчитанное значение t -критерия превышало табличное значение $t_{кр}$, то между двумя переменными существует корреляционная связь при постоянном значении третьей переменной, включенной в модель регрессии.

Определялось значение доверительного интервала расчитанных частных коэффициентов корреляции с помощью z -преобразования Фишера

$$z - t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}} \leq z \leq z + t_\phi \cdot \sqrt{\frac{l}{n - l - 3}}. \quad (24)$$

По формуле [1] рассчитывалось значение множественного коэффициента корреляции, который определяет степень взаимосвязи между зависимой переменной x и независимыми переменными y и z :

$$r_{x-yz} = \sqrt{\frac{r_{xy}^2 + r_{xz}^2 - 2r_{xy} \cdot r_{xz} \cdot r_{yz}}{1 - r_{yz}^2}}. \quad (25)$$

Значимость множественного коэффициента корреляции оценивалась с помощью F -критерия Фишера [1]:

$$F_\phi [m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{x-yz}^2}{2 \cdot (1 - r_{x-yz}^2)}. \quad (26)$$

Фактическое расчетное значение F -критерия сравнивалось с табличным значением $F_{кр}$ при заданном уровне значимости, принятом равным $\alpha = 0,05$. Множественный коэффициент корреляции признавался значимым на уровне α в случае, если фактическое значение F_ϕ превышало табличное $F_{кр}$.

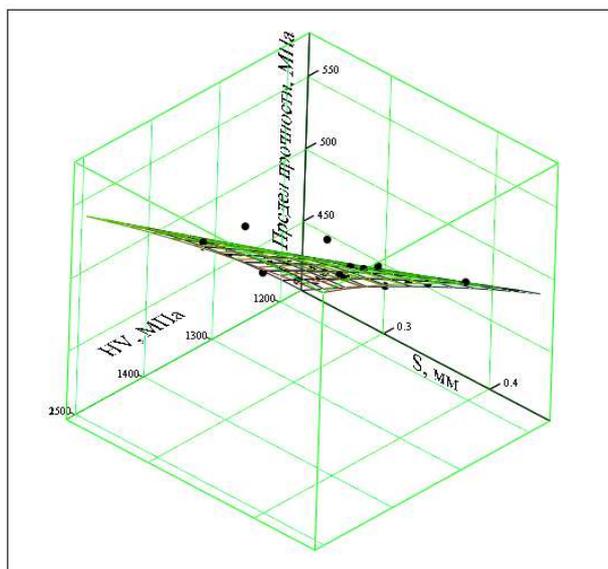
Определение предела прочности материала неразрушающим методом. При помощи представленного выше алгоритма описана взаимосвязь между пределом прочности σ_b металла магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и 09Г2С, и параметрами, получаемыми при измерении твердости по Виккерсу, которая представляет собой полиномиальную функцию

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot HV^{l_{i,1}} \cdot S^{l_{i,2}}), \text{ МПа,} \\ \sigma_b = \sum_{i=1}^{i=6} \left(K_i \cdot \left(\frac{370,88}{D^2} \right)^{l_{i,1}} \cdot S^{l_{i,2}} \right), \text{ МПа,} \end{array} \right. \quad (27)$$

где i – порядковый номер соответствующего показателя степени или коэффициента; K_i – коэффициенты полинома; $I_{i,1}$ – показатель степени при HV ; $I_{i,2}$ – показатель степени при S .

Представленные в формуле (27) коэффициенты и показатели степени имеют следующие значения: $K_1 = -0,696$; $K_2 = -313,888$; $K_3 = 1406$; $K_4 = -847,252$; $K_5 = 1,271$; $K_6 = -2,598 \times 10^{-4}$; $I_{1,1} = 1$; $I_{2,1} = 0$; $I_{3,1} = 0$; $I_{4,1} = 0$; $I_{5,1} = 1$; $I_{6,1} = 2$; $I_{1,2} = 1$; $I_{2,2} = 2$; $I_{3,2} = 1$; $I_{4,2} = 0$; $I_{5,2} = 0$; $I_{6,2} = 0$.

Графическое отображение регрессии экспериментальных данных $\sigma_{вi}$, HV_i , S_i для магистральных трубопроводов, изготовленных из сталей 20 и 09Г2С, представляет собой полиномиальную поверхность, представленную на рисунке 1.



F. (HV, S, σ)

Рисунок 1. – Полиномиальная поверхность регрессии экспериментальных данных $\sigma_{вi}$, HV_i , S_i

Рассчитанные значения парных коэффициентов корреляции Пирсона между экспериментальными значениями параметров $\sigma_{в}$, HV и S приведены в таблице.

Таблица. – Значения парных коэффициентов корреляции между $\sigma_{в}$, HV и S

Факторный признак	Значения коэффициентов корреляции		
	$\sigma_{в}$	HV	S
S	0,781	0,501	1,0
HV	0,909	1,0	0,501
$\sigma_{в}$	1,0	0,909	0,781

Данные в таблице показывают, что значение твердости HV оказывает большее влияние по сравнению с S на $\sigma_{в}$, т.к. парный коэффициент корреляции для $\sigma_{в}$ и HV больше, чем для $\sigma_{в}$ и S . Значение парного коэффициента корреляции между HV и S свидетельствует о том, что корреляцию между этими величинами можно оценить как среднюю. При этом взаимосвязь между $\sigma_{в}$ и S более тесная, чем между HV и S . Частные коэффициенты корреляции $r_{\sigma_{в}HV,S} = 0,957$ и $r_{\sigma_{в}S,HV} = 0,902$, демонстрирующие связь между $\sigma_{в}$ и HV , при постоянном S больше, чем парные коэффициенты корреляции, определяющие связь между $\sigma_{в}$ и S при постоянном HV , равные 0,909 и 0,781 соответственно. Это объясняется исключением влияния третьей переменной при определении тесноты взаимосвязей с помощью частных коэффициентов корреляции.

Определим значения t -критерия Стьюдента, подставив соответствующие значения в формулу (23), что позволит провести проверку статистической гипотезы отличия частных коэффициентов корреляции от нуля:

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_{в}HV,S}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_{в}HV,S}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,957}{\sqrt{1 - 0,957^2}} \cdot \sqrt{24 - 2 - 2} = 14,754;$$

$$t_{\phi 1} = \frac{r_{\sigma_{в}S,HV}}{\sqrt{1 - r_{\sigma_{в}S,HV}^2}} \cdot \sqrt{n - l - 2} = \frac{0,902}{\sqrt{1 - 0,902^2}} \cdot \sqrt{24 - 2 - 2} = 9,343.$$

Расчитанные значения t -критерия попали в критическую область, т.е. они превышают табличное значение коэффициента Стьюдента $t_{кр} = 2,021$ для уровня значимости 0,05 [1]. Это говорит о значимости частных коэффициентов корреляции.

Определим множественный коэффициент корреляции между σ_b , HV и S по формуле (25):

$$r_{\sigma_b-HVS} = \sqrt{\frac{0,909^2 + 0,781^2 - 2 \cdot 0,909 \cdot 0,781 \cdot 0,501}{1 - 0,501^2}} = 0,984.$$

Для проверки значимости множественного коэффициента корреляции было определено значение критерия Фишера по формуле (26):

$$F_{\Phi}[m, n - (m + 1)] = \frac{[n - (m + 1)] \cdot r_{\sigma_b-HVS}^2}{2 \cdot (1 - r_{\sigma_b-HVS}^2)} = \frac{[24 - (2 + 1)] \cdot 0,984^2}{2 \cdot (1 - 0,984^2)} = 320,271.$$

Расчитанное значение критерия Фишера превышает критическое значение $F_{кр} = 3,2317$ для уровня значимости $\alpha = 0,05$, поэтому наличие устойчивой корреляции между σ_b , HV и S является статистически значимым. Это говорит о совместном влиянии значений HV и S на величину σ_b .

С помощью замены переменных установлена линейная зависимость между отношением σ_b/HV и S , которая для исследованных сталей магистральных трубопроводов (20 и 09Г2С) представлена формулой

$$\begin{cases} \frac{\sigma_b}{HV} = 0,318 + 0,183 \cdot S, \text{ МПа;} \\ \left(\frac{\sigma_b}{\frac{370,688}{D^2}}\right) = 0,318 + 0,183 \cdot S, \text{ МПа.} \end{cases} \quad (28)$$

Найден коэффициент корреляции для данной зависимости $r = 0,892$. Для проверки статистической гипотезы отличия частных коэффициентов корреляции от нуля определим значения t -критерия Стьюдента, воспользовавшись формулой (23):

$$T_{\text{расч.}} = \frac{r \cdot \sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} = \frac{0,892 \cdot \sqrt{24 - 2}}{\sqrt{1 - 0,892^2}} = 9,256.$$

Расчитанное значение t -критерия Стьюдента больше критического $t_{ам} = 2,021$ [1], поэтому можно констатировать, что существует устойчивая корреляция между отношением σ_b/HV и S на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Тесная связь между отношением σ_b/HV и S визуальнo отображена на рисунке 2, где представлена построенная линия регрессии с нанесенными экспериментальными точками, а также значениями ошибок в виде вертикальных линий, соединяющих линию регрессии с экспериментальными точками.

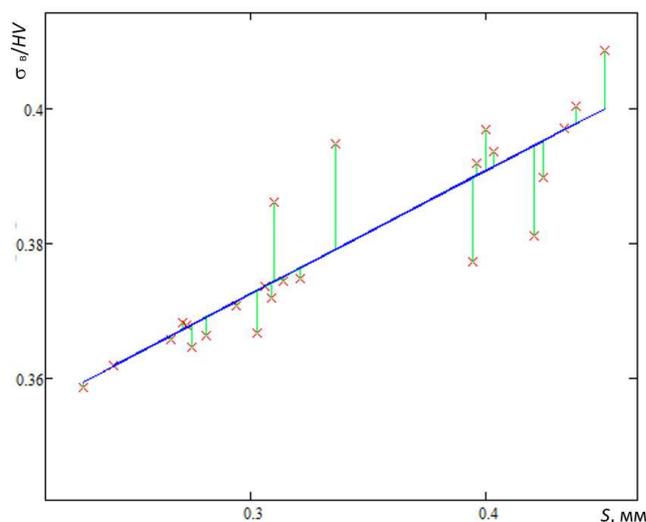
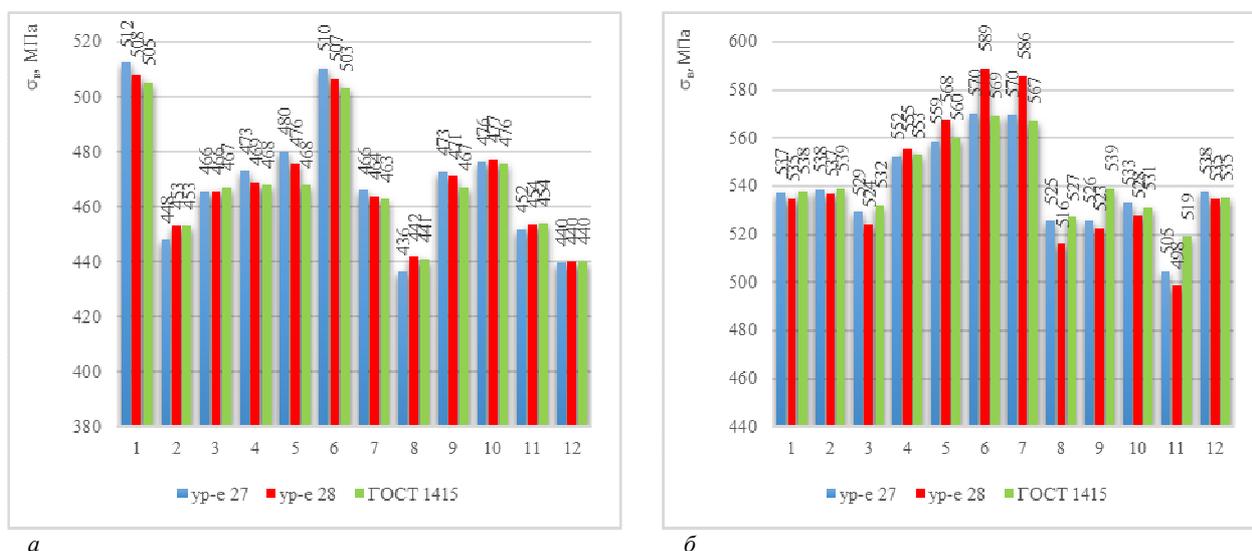


Рисунок 2. – Линейная регрессия экспериментальных данных $\sigma_b/HV_i = S_i$ для сталей 20 и 09Г2С

Сравнение полученных экспериментальным путем и расчетных значений значений предела прочности труб магистральных трубопроводов представлено на рисунке 3.

Наилучшая сходимость расчетных и экспериментальных значений получается при использовании полиномиальной многомерной регрессии для стали 09Г2С и линейной регрессии для стали 20. При этом отклонение расчетных значений не превышает 4,0%.



а – сталь 20; б – сталь 09Г2С

Рисунок 3. – Сравнение значений предела прочности материала труб магистральных трубопроводов, рассчитанных по формулам (27), (28) и определенных экспериментально по ГОСТ 1497

Определение относительного удлинения материала неразрушающим методом. Взаимосвязь между относительным удлинением δ_5 металла труб магистральных трубопроводов и параметрами пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, уточнялась путем решения регрессии экспериментальных данных. Проводился расчет как полиномиальной регрессии данных, так и линейной регрессии между отношением δ_5/D и S в соответствии с описанным выше алгоритмом. При проведении расчетов было выявлено, что коэффициент корреляции для всей выборки экспериментальных данных равен 0,329, что свидетельствует о слабой корреляционной связи. Высокая степень корреляции выявлена при решении полиномиальной регрессии по отдельным маркам сталей. Полиномиальная функция, описывающая взаимосвязи между параметрами пирамидального отпечатка и δ_5 для металла магистральных трубопроводов, представлена в виде формулы

$$\delta_5 = \sum_{i=1}^{i=6} (K_i \cdot D^{I_{i,1}} \cdot S^{I_{i,2}}), \tag{29}$$

где i – порядковый номер соответствующего показателя степени или коэффициента; K_i – коэффициенты полинома; $I_{i,1}$ – показатель степени при D ; $I_{i,2}$ – показатель степени при S .

Представленные в формуле (29) коэффициенты и показатели степени имеют следующие значения:

для стали 20 $K_1 = 0,309$; $K_2 = 294,832$; $K_3 = -363,313$; $K_4 = 338,45$; $K_5 = -0,105$; $K_6 = 1,423 \times 10^{-4}$; $I_{1,1} = 1$; $I_{2,1} = 0$; $I_{3,1} = 0$; $I_{4,1} = 0$; $I_{5,1} = 1$; $I_{6,1} = 2$; $I_{1,2} = 1$; $I_{2,2} = 2$; $I_{3,2} = 1$; $I_{4,2} = 0$; $I_{5,2} = 0$; $I_{6,2} = 0$;

для стали 09Г2С $K_1 = 0,333$; $K_2 = 837,504$; $K_3 = -990,093$; $K_4 = 170,35$; $K_5 = 0,54$; $K_6 = -1,563 \times 10^{-4}$; $I_{1,1} = 1$; $I_{2,1} = 0$; $I_{3,1} = 0$; $I_{4,1} = 0$; $I_{5,1} = 1$; $I_{6,1} = 2$; $I_{1,2} = 1$; $I_{2,2} = 2$; $I_{3,2} = 1$; $I_{4,2} = 0$; $I_{5,2} = 0$; $I_{6,2} = 0$.

Корреляционные уравнения линейной регрессии для сталей 20 и 09Г2С соответственно имеют вид:

$$\delta_5 = D \cdot (1,273 + (-0,277) \cdot S), \tag{30}$$

$$\delta_5 = D \cdot (0,593 + 0,813 \cdot S). \tag{31}$$

Множественные коэффициенты корреляции между δ_5 , D и S составили: для стали 20 $r_{\delta_5-D} = 0,961$, для стали 09Г2С – $r_{\delta_5-D} = 0,931$. Определены значения парных коэффициентов корреляции связей δ_5-D и δ_5-S , равные 0,997 и 0,773 для стали 20 и 0,904 и 0,967 для стали 09Г2С. Парные коэффициенты корреляции между самими факторными признаками (D и S) для стали 20 составили 0,752, для стали 09Г2С – 0,851. Полученные результаты не позволяют сделать однозначные выводы о преимущественном влиянии факторных признаков D и S на δ_5 для сталей магистральных трубопроводов.

Сопоставление результатов, полученных расчетным путем, с экспериментальными данными показывает, что отклонения не превышают 10%. Максимальные отклонения при использовании в расчетах уравнений полиномиальной регрессии для стали 20 составили 1,7%, для стали 09Г2С – 8,1%. Максимальные отклонения для стали 20 при использовании в расчетах уравнений линейной регрессии 1,8%, для стали 09Г2С – 7,0%.

Расчетные значения критерия Фишера ($F_{\phi} = 443,21$ для стали 20 и $F_{\phi} = 54,132$ для стали 09Г2С) для полиномиальной регрессии и коэффициента Стьюдента ($T_{расч.} = 4,037$ для стали 20 и $T_{расч.} = 9,285$ для стали 09Г2С) для линейной регрессии превышают критические значения $F_{кр} = 5,7861$ и $t_{ам} = 2,228$. Поэтому корреляционная связь между δ_5 , D и S , а также отношением δ_5/D и S статистически значима для магистральных трубопроводов, изготовленных из стали 20 и 09Г2С.

Определение относительного сужения материала неразрушающим методом. В результате проведенного регрессионного анализа установлено, что зависимость между относительным сужением ψ сталей и шириной пирамидального отпечатка S для металла труб магистральных трубопроводов является линейной. По итогу проведенных расчетов значение коэффициента корреляции показывает статистически значимую взаимосвязь между ψ и S только при рассмотрении экспериментальных данных отдельно по каждому из материалов. Значения коэффициентов корреляции $r_{\psi-S}$ составили 0,961 для стали 20 и 0,974 для стали 09Г2С. Определены значения углового и свободного коэффициентов линейной регрессии экспериментальных данных, представленные в формулах (32) и (33) для сталей 20 и 09Г2С соответственно:

$$\psi = 0,03 + 1,411 \cdot S, \quad (32)$$

$$\psi = -0,082 + 1,266 \cdot S. \quad (33)$$

Отклонение определенных расчетным путем и экспериментальных значений, полученных по ГОСТ 1497, находится в пределах 3%. При этом корреляционная взаимосвязь между ψ и S является статистически значимой, т.к. расчетные значения t -критерия Стьюдента для линейной регрессии $T_{расч.} = 6,065$ для стали 20 и $T_{расч.} = 7,757$ для стали 09Г2С больше табличного $t_{ам} = 2,228$ при уровне значимости 0,05.

Определение ударной вязкости материала неразрушающим методом. Определить значения ударной вязкости металла магистральных трубопроводов возможно расчетным путем, используя ее корреляционную взаимосвязь со значениями относительного удлинения⁵:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{\Psi}{1 - \psi}, \text{ МДж/м}^2, \quad (34)$$

где KCU – ударная вязкость, МДж/м²; γ – коэффициент пропорциональности, определяемый в зависимости от механических свойств металла и равный 0,76–0,83 для трубных сталей; ψ – относительное сужение, отн. ед.

При этом значения относительного сужения ψ могут быть определены по параметрам пирамидального отпечатка, полученного при измерении твердости по Виккерсу, что позволяет отказаться от вырезки стандартных образцов с последующим их испытанием.

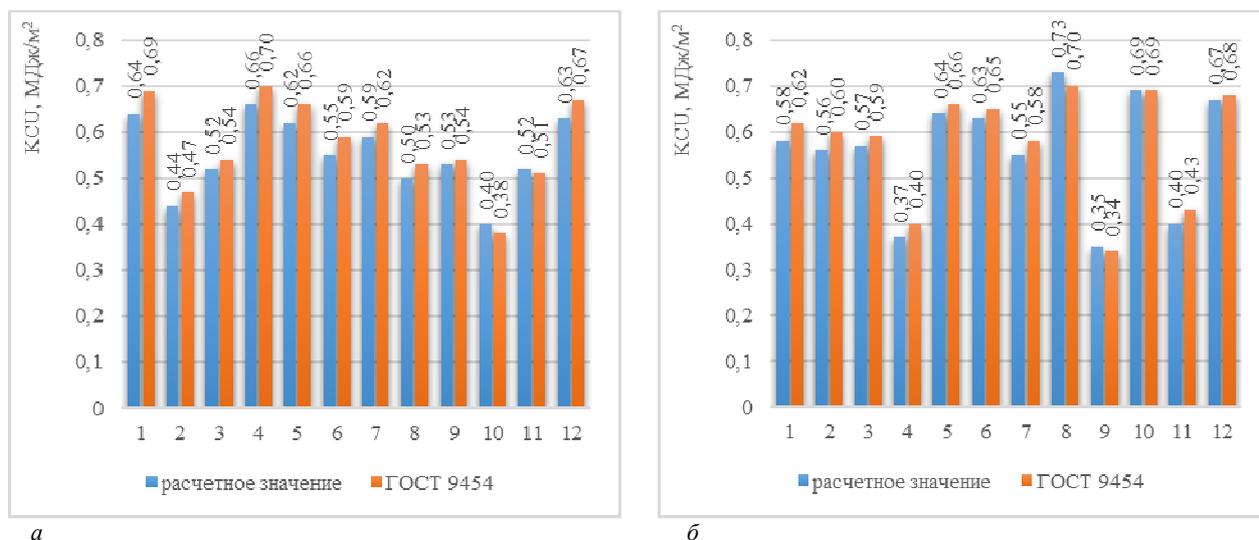
Заменив в формуле (34) относительное сужение ψ корреляционными уравнениями (32) и (33), получим формулы (35) и (36), которые позволят определять ударную вязкость материала труб магистральных трубопроводов по размерам отпечатков при измерении твердости по Виккерсу:

$$KCU = \gamma \cdot \frac{0,03 + 1,411 \cdot S}{0,97 - 1,411 \cdot S}, \quad (35)$$

$$KCU = \gamma \cdot \frac{-0,082 + 1,266 \cdot S}{1,082 - 1,266 \cdot S}. \quad (36)$$

После проведенных расчетов ясно, что наиболее близкие результаты рассчитанных значений ударной вязкости к экспериментальным данным получены при значении коэффициента пропорциональности $\gamma = 0,76$. Сравнение рассчитанных по уравнениям (35) (для стали 20) и (36) (для стали 09Г2С) значений ударной вязкости с экспериментальными значениями, полученными в результате испытаний в соответствии с ГОСТ 9454, представлено в виде диаграмм на рисунке 4.

⁵ Крыленко А.В. Обеспечение безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования на основе контроля деградации структуры и изменения механических свойств материала конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 237 л.



а – сталь 20; б – сталь 09Г2С

Рисунок 4. – Сравнение значений ударной вязкости материала труб магистральных трубопроводов, рассчитанных по формулам (35), (36) и определенных экспериментально по ГОСТ 9454

Разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 8%, что позволяет проводить оценку ударной вязкости неразрушающим способом непосредственно на магистральном трубопроводе.

Закключение. Полученные корреляционные уравнения позволяют математическим путем определить значения параметров механических свойств труб магистральных трубопроводов на основании определения твердости по Виккерсу и измерения значений размеров пирамидального отпечатка. В полевых условиях данные измерения могут быть проведены с использованием переносных твердомеров и микроскопов. Предлагаемый неразрушающий метод показывает достаточную точность для его применения в качестве экспресс-метода оценки механических свойств металла труб в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов, что даст возможность отказаться от дорогостоящих работ, связанных с вырезкой образцов для проведения механических испытаний, а также повысит безопасность эксплуатации объектов трубопроводного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миркин Б.Г. Введение в анализ данных: учебник и практикум. – М.: Юрайт, 2023. – 174 с.

REFERENCES

1. Mirkin, B.G. (2023). Vvedenie v analiz dannykh: uchebnik i praktikum. Moscow: Yurait. (In Russ.)

Поступила 12.03.2024

NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF METAL OF MAIN PIPELINES

A. SNARSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

A. YANUSHONAK

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The paper presents a method of non-destructive testing of main pipelines, based on the possibility of indirectly determining the basic mechanical properties of metal using a non-destructive method. Correlation equations were obtained for the relationship between Vickers hardness values and the measured dimensions of the pyramidal indent obtained during hardness testing with the mechanical properties of the metal of main pipeline pipes. The results of statistical processing of experimental data of the studied relationships for main pipeline pipes made of steel 20 and steel 09G2S are presented.

Keywords: main pipelines, non-destructive testing, mechanical properties, hardness.